

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto

Rakennetekniikan laitos

Sirpa Lukkala

PUURAKENTEIDEN KOSTEUSPITOISUUDET JA VAURIOT

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
RAKENNE- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN  
LAITOSTEN KIRJASTO

Diplomityö, joka on jätetty  
opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa  
varten Otaniemessä 12.10.1987.

Työn valvoja:

Professori Pekka Kanerva

Työn ohjaajat:

DI Ilmari Absetz

DI Tomi Toratti

Tekijä ja työn nimi: Sirpa Lukkala

Puurakenteiden kosteuspitoisuudet ja vauriot

Päiväys: 12.10.1987

Sivumäärä: 138

Osasto :

Maanmittaus- ja rakennus-  
tekniikan osasto

Professori:

Talonrakennustekniikka

Työn valvoja:

Professori Pekka Kanerva

Työn ohjaajat:

DI Ilmari Absetz , DI Tomi Toratti

Työssä on tutkittu puun vaurioitumista ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä puun kasvuvaiheessa että sen ollessa osana rakennetta. Puuhun kasvuvaiheessa syntyviä, lujuuteen vaikuttavia vikoja ovat haavat, irto-oksat ja reaktiopuu. Oksat voivat alentaa vetolujuutta jopa 85 % ja puristuslujuutta 22 %. Reaktiopuun käyttöä haittaa suuri pituussuuntainen kutistuminen, 6 - 7 % lyllyllä ja noin 1% vetopuulla. Rakenteissa esiintyviä vaurioita ovat halkeamat, laho, home, sinistymä ja pinnan eroosio.

Työ on kirjallisuustutkimus, jota ovat tukeneet haastattelut, kenttäkäynnit ja -mittaukset. Erytisesti on käsitelty eri olosuhdetekijöitä ja niiden yhdistelmiä sekä useita erityyppisiä esimerkkikohteita, joiden vaurioita sekä vaurioitumiseen johtaneita tekijöitä on esitelty tekstissä ja useiden valokuvien avulla.

Vaurioita puurakenteisiin aiheuttavat sekä liian suuri että liian pieni kosteus ja kosteuden vaihtelu. Liian pienenä kosteutena voidaan yleensä pitää 30 %RH ja liian suurena 80 %RH. Vaurioituvuuteen vaikuttavat myös pinnoite, kontakti toiseen rakennusaineeseen, aika ja auringon säteily.

Lahoamisen, sinistymisen ja homehtumisen vaatimat olosuhteet ovat pääosiltaan samat. Sienirihmasto kasvaa parhaiten +25 - 30°C:n lämpötilassa ja puun kosteuden ollessa 30 - 60 %. Lahoattajasienet käyttävät ravinnokseen puun perusaineita ja heikentävät sen lujuutta. Sinistäjä sienet elävät puun solunteloiden ravintoaineilla, eivätkä vaikuta puun lujuuteen.

Halkeamia syntyy kutistumisen seurauksena puun sisäosan jäädessä kosteammaksi kuin pinta tai kun kosteusmuodonmuutokset on estetty. Liimapuurakenteiden halkeamat pyrkivät ohjautumaan sormijatkosten sekä reikien, lovien ja pulttien aiheuttamien jännityshuippujen kohdalle.

Työn tuloksena laadittiin vaurioluokitus, jossa vaurion vakavuuden mukaan vauriot on jaettu kolmeen luokkaan. Liitteenä on taulukko, jossa on esitetty yhteenveto oletettavista kosteuspitoisuuksista ja lämpötiloista eri rakennusosissa.



Author and name of the thesis: Sirpa Lukkala  
The Moisture Contents and Damages of Wooden Structures

Date : 12.10.1987

Pages: 138

Department :  
Faculty of Surveying and  
Civil Engineering

Professorship :  
Structural Engineering and  
Building Physics

Supervisor :  
Professor Pekka Kanerva  
Instructors:  
M.Sc. Ilmari Absetz , M.Sc. Tomi Toratti

In this thesis the damaging of wood and the factors effecting it are studied in growing wood and in wooden structures. The considered defects of growing wood are checks, loosen knots and reaction wood. Knots may decrease tensile strength up to 85% and compression strength 22%. The use of reactionwood is difficult because of it's high longitudinal shrinkage, 6 - 7% in compression wood and about 1 % in tension wood. The considered damages of wooden structures are checks, rot, mould, blue stain and erosion of the surface.

This is a literature survey completed with interviews, field inspections and field measurements. Special attention has been given to the different climate factors on wooden structures. Also example cases of damages from the field are analyzed.

A low, high and variation in moisture content is one cause for damages in wooden structures. As a too low moisture content can usually be considered 30 %RH and too high 80 %RH. The damaging tendency is effected also by coating and impregnation of wood, contact to another building material, time and solar radiation.

Rotting, blue staining and mould grow in similar environmental conditions. The hyphae grows best in temperature +25 - 30°C and when the moisture content of wood is 30 - 60%. Rot fungi use the wood cell wall as their nourishment and weaken the strength of wood. Blue staining fungi use nourishments found in the cell cavity and thus the strength of wood is not effected.

Checks appear as a result of shrinking as the inner part of the cross section dries slower than the surface or when the dimensional changes are restrained. Checks in laminated timber structure are likely to occur at stresspeaks by holes, notches or bolts.

A classification of damages was produced as a result of this study. Damages are classified into three groups. In the appendix moisture contents and temperatures in different structural sections are shown.

## ESIPUHE

Diplomityössäni olen tutkinut puurakenteiden kosteuspi-toisuuksia ja vaurioita ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä kirjallisuudesta että kenttäkäyntejä ja -mittauksia ja haastatteluita tekemällä. Kirjallisuusosassa, luvuis-sa 2 - 5, on tarkasteltu puun rakennetta, vauriotyyppejä, vaurioita aiheuttavia tekijöitä sekä vaurioiden kannalta kriittisiä olosuhdetekijöitä. Luvussa 6 on esitetty esi-merkkikohteiden avulla erilaisia laho- ja halkeiluvauri-oita.

Työ on osa Suomen Akatemian ja TEKES:in yhdessä rahoitta-maa kolmevuotista tutkimusta, jonka aiheena on puun kos-teustekniset ominaisuudet ja kosteuden vaikutus puurakenteisiin.

Työ on tehty professori Pekka Kanervan johdolla. Kiitän häntä saamastani ohjauksesta ja terävistä kommenteista. Erityisesti haluan kiittää työni ohjaajia DI Ilmari Absetzia ja DI Tomi Torattia. He ovat antaneet asiallis-ta kritiikkiä ja muokanneet lennokasta kielenkäyttöäni lähemmäs teknisen tekstin asialinjaa.

Kiitän DI Tapio Jauhiaista haastatteluissa saamistani tiedoista sekä erinomaisista valokuvista. Kiitokset haastatteluissa saaduista tiedoista myös Jarmo Tiirikaiselle, Tapio Kankolle, Jorma Kankaalle, Mika Leivolle, Panu Kailalle ja Hannu Viitaselle.

Erityiskiitokset ansaitsee myös työtoverini ja ystäväni Erkki Hassinen, sillä hän on työni tekemisen aikana tuke-nut minua henkisesti sekä olemalla miellyttävä työtoveri että hyvä ystävä.

Otaniemessä 12.10.1987

*Sirpa Lukkala*  
Sirpa Lukkala



## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PUUN RAKENNE VAURIOITUMISEN KANNALTA	2
2.1 Yleistä	2
2.2 Puun vikaisuus	5
2.2.1 Haavat	5
2.2.2 Oksat	6
2.2.3 Reaktiopuu	7
2.2.4 Kasvujännitykset	9
2.3 Puulajien väliset erot	10
3. VAURIOTYYPIT	14
3.1 Lahovauriot	14
3.2 Home- ja sinistymävauriot	17
3.3 Halkeilu	18
3.4 Eroosio	19
3.5 Muut vauriot	20
4. VAURIOITA AIHEUTTAVAT FYSIKAALISET TEKIJÄT	22
4.1 Yleistä	22
4.2 Puun kosteuspitoisuus	23
4.2.1 Suuri kosteus	23
4.2.2 Alhainen kosteus	24
4.3 Kosteuspitoisuuteen vaikuttavat tekijät	25
4.3.1 Kosteuden vaihtelu	25
4.3.2 Rakenteeseen kertyvä kosteus	26
4.3.3 Pinnoite	29
4.3.4 Kontakti ja kosteus	31
4.3.5 Muut kontaktit	34
4.3.6 Puun sisältämän veden jäätyminen	35
4.4 Happi	37

4.5	Lämpötila	38
4.6	Auringon säteily	40
5.	VAURIOIDEN KANNALTA KRIITTISET OLOSUHDETEKIJÖIDEN YHDISTELMÄT	42
5.1	Yleistä	42
5.2	Lahoamisolosuhteet	42
5.3	Homehtumis- ja sinistymisolosuhteet	46
5.4	Halkeiluolosuhteet	49
5.4.1	Vaihteleva kosteus	49
5.4.2	Liian pieni kosteus	50
5.4.3	Jännitystilan ja kosteuden yhteisvaikutus	51
5.5	Eri puulajien vaurioalttius	54
6.	PUURAKENTEIDEN KOSTEUS- JA VAURIOTUTKIMUKSIA	55
6.1	Alapohjien vauriot	55
6.2	Yläpohjan ja kantavien rakenteiden vauriot	56
6.3	Laho- ja homevauriot	69
6.4	Väriverot	83
6.5	Ikkunoiden vauriot	87
6.6	Muut rakenteet	91
6.7	Pinnoitekokeet	101
6.8	Sääkokeet	110
6.9	Puurakenteiden kenttätutkimusmenetelmät	114
7.	PÄÄTELMÄT	118
7.1	Vaurioluokitus	119
7.2	Jatkotutkimusehdotuksia	125
8.	YHTEENVETO	127
	KIRJALLISUUSLUETTELO	129
	LIITE 1	
	LIITE 2	



## 1 JOHDANTO

Puu on tunnetusti vaurioitumisaltis rakennusaine, sillä se on mekaanisten vaurioiden lisäksi altis myös biologisille vaurioille. Vaurioiden syntymiseen johtavat tekijät ovat vähemmän tunnettuja. Vaikeutena on vaurioiden esiintyminen sellaisissakin paikoissa, joissa olosuhteet huomioon ottaen ei pitäisi vaurioitumista tapahtua. Toisaalta myös täysin tervettä puuta on löydetty paikoista, joissa kaikki vaurioitumisedellytykset ovat olemassa.

Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mitä ovat puun vauriot, mitkä ovat vaurioitumiseen tarvittavat kriittiset olosuhdetekijät ja millaisia kosteuspitoisuuksien mittauksia on tehty.

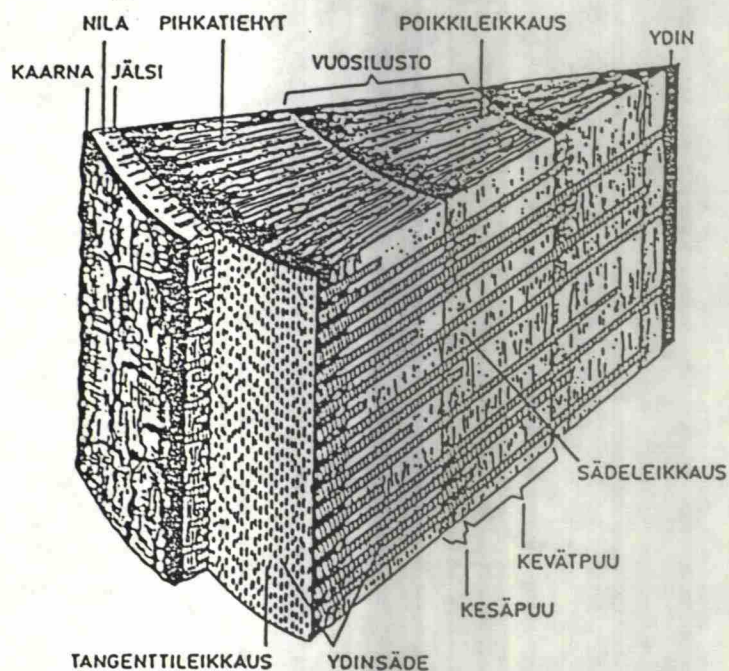
Tarkastelu on rajattu koskemaan vain massiivisia puurakenteita. Kuitu- ym. levyt ja niiden kosteuskäyttäytyminen on jätetty tutkimuksen ulkopuolelle. Puurakenteiden vaurioiden tarkastelu on jaettu laho- ja homevaurioihin, värivaurioihin ja halkeiluun. Hyönteisten aiheuttamia vaurioita ei ole käsitelty.

## 2 PUUN RAKENNE VAURIOITUMISEN KANNALTA

### 2.1 Yleistä

Puun rakenteelle on ominaista anisotrooppisuus. Sen ominaisuudet vaihtelevat kolmessa pääsuunnassa: pituussuunta, tangentin suunta ja säteen suunta. Puun vetolujuus säteen suunnassa eli kohtisuoraan syitä vastaan on noin 10 - 20 % syiden suuntaisesta vetolujuudesta. Lujuus säteen suunnassa on noin 50 % suurempi kuin tangentin suunnassa. Tiheyden kasvu ja kosteuden pieneneminen lisäävät lujuuksia kaikissa suunnissa. Puun syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus on pienempi kuin syiden suuntainen. Syiden kierteisyys pienentää kuitenkin pituussuuntaista puristuslujuutta.

Vuosirenkaat muodostuvat vaaleasta, huokoisesta kevätpuusta ja tummasta, tiiviistä kesäpuusta. Raja ei kaikilla puulajeilla ole selvä. Vuosirenkaiden paksuuteen eli kasvunopeuteen vaikuttaa kasvupaikka ja ravinteiden määrä. Mitä suotuisammat kasvuolosuhteet puulla on, sitä paksumpi on vuosirengas eli vuosilusto.



Kuva 2.1 Kaaviokuva männyn rungosta./36/



Puun poikkileikkaus jaetaan tavallisesti pinta- ja sydänpuuhun. Pintapuussa tapahtuu nesteiden virtaus juurien ja oksaston välillä. Sydänpuun solut ovat kuolleita ja ne sisältävät yleensä runsaasti uuteaineita. Siksi sydänpuu onkin erittäin kestävää lahoa ja sään vaikutuksia vastaan. Männyllä sydänpuu on tummempaa kuin pintapuuta, mutta kuusella ja koivulla ei värieroja ole.

Havupuiden solut ovat pääasiassa puun pituussuuntaisia trakeideja eli vesisoluja. Ne kuljettavat pintapuun ulkokerroksissa vettä ja ravintoaineita. Ydinsäteet ovat säteen suuntaisia soluja. Havupuilla on pihkatiehyitä, jotka voivat olla rungon pituussuuntaisia tai ydinsäteiden suuntaisia. Lehtipuilla solujen valtaosa on kuituja. Näkyvimpiä lehtipuiden soluja ovat kuitenkin pituussuuntaiset putkilot. Lehtipuiden ydinsäteet ovat helpommin havaittavissa kuin havupuiden.

Kemialliselta koostumukseltaan puusolut muodostuvat pääasiassa selluloosasta, ligniinistä ja hemiselluloosasta. Selluloosaa on soluissa 40 - 50 %, ligniiniä 15 - 35 % ja hemiselluloosaa 20 - 35 %./26/ Selluloosa muodostaa soluseinän rungon ja vaikuttaa näin voimakkaimmin puun lujuuteen. Ligniini ja hemiselluloosa ovat selluloosarunkoa ympäröivää väliainetta. Lahottajasienet tuhoavat näitä puun perusrakennusaineita ja vaikuttavat näinollen puun lujuuteen. Sinistäjä sienet käyttävät ravinnokseen soluonteloiden ravintoaineita, jolloin puun lujuusominaisuudet eivät yleensä huonone.

Kosteus imeytyy puuhun parhaiten syiden suunnassa ja se kulkeutuu puun pituussuuntaisia soluja pitkin keskiosiin. Imeytyvän veden määrä riippuu lämpötilasta, kosteudesta ja puulajista. Puulajeilla, joiden tiheys on 400 - 600 kg/m<sup>3</sup>, on pituussuuntainen diffuusiokerroin 5 - 8 kertaa suurempi kuin syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa./29/ Alhaisilla kosteuspitoisuuksilla saattaa suhde olla jopa 16. Ydinsäteiden määrä vaikuttaa säteen suuntaiseen

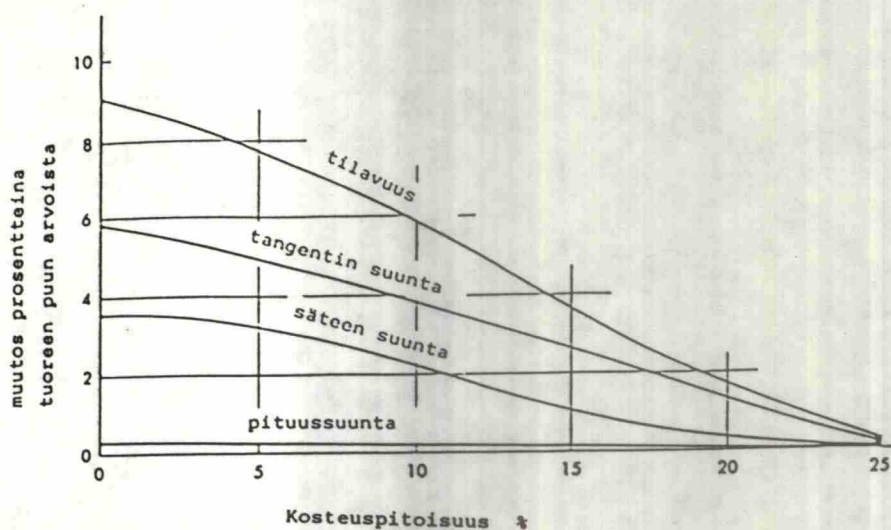
diffuusioon. Mitä enemmän ydinsäteitä, sitä suurempi on säteen suuntainen diffuusio tangentin suuntaiseen diffuusioon verrattuna.

Tuoreessa puussa voi kosteuspitoisuus olla jopa useita satoja prosentteja. Kuivumiskutistuma alkaa puun kosteuspitoisuuden laskiessa alle puunsyiden kyllästymispisteen. Kuivatettaessa puu tuoreesta sisäkuivaksi, noin 12 %:iin, on kuivumiskutistuma tangentin suunnassa keskimäärin 3,5 - 15 %, säteen suunnassa 2,4 - 11,0 % ja pituussuunnassa vain 0,1 - 0,9 %./29/ Tangentin ja säteen suuntaiset kutistumat ovat sitä suuremmat, mitä tiheämpää puu on. Kevätpuun kosteusmuodonmuutokset ovat pienemmät kuin kesäpuulla./32/ Taulukossa 2.1 on esitetty eri puulajien kutistumisprosentit kuivattaessa puu tuoreesta vedettömäksi.

Taulukko 2.1 Muutamien puulajien kutistuminen tuoreesta vedettömäksi./35//26/

puulaji	tiheys(kg/m <sup>3</sup> )	T (%)	R (%)	T/R
Balsa	170	5,2	1,7	3,05
Haapa	450	8,5	3,5	2,43
Kuusi	460	7,5	3,7	2,03
Mänty	490	7,4	3,5	2,11
Mahonki	600	5,1	3,2	1,59
Teak	680	5,5	2,9	1,90
Tammi	690	7,8	4,0	1,95
Ebenpuu	1050	12,8	8,2	1,56





Kuva 2.2 Puun kutistumiskäyrät, jotka perustuvat kuudella eri amerikkalaisella puulajilla tehtyihin kokeisiin./35/

## 2.2 Puun vikaisuus

Puuaineksessa olevat viat ja kasvujännitykset vaikeuttavat puun käyttöä ja saattavat aiheuttaa rakennevaurioita. Jo sahausvaiheessa tulee ongelmia, mikäli puu on kierteistä tai muuten jännityksen alaista. Puun kuivues-  
sa syntyvät kuivumisjännitykset ovat haitallisia sahata-  
varan käyttöä ajatellen. Puun viat jaetaan yleisesti  
runkovikoihin ja puuaineen vikoihin./14/ Puuaineen viat  
vaikuttavat enemmän rakennevaurioihin, sillä niitä ei ai-  
na huomata ennen vaurion syntyä.

### 2.2.1 Haavat

Erilaiset haavat puuaineksessa alentavat puutavaran laa-  
tua luokiteltaessa. Erityisen pahoja vikoja ovat lahon  
ja sinistymän aiheuttamat haavat. Muita haavojen aiheut-  
tajia ovat eläimet ja ihmiset puita kolhiessaan. Haavan  
ympärillä oleva solukko muuttuu, syntyy haavasolukkoa,  
jonka ansiosta haava vähitellen peittyy. Peittyminen on

suomalaisilla puulajeilla erittäin hidasta ja haavassa saattavat bakteerit ja sienet aiheuttaa vaurioita. Päällepäin haavat näkyvät rungossa olevina kohoumina, sillä haavan sivuille muodostuva kyljes kasvattaa vuosilustoa sisällepäin ja kuorta ulospäin. Tällöin jää usein puun kuorta puuaineen sisään, mikä huonontaa ja lyhentää sahatavaraa./14/ Haavakohdista vesi pääsee puun sisään, jolloin puun kosteuspitoisuus nousee.

Haavoja ovat myös pakkashalkeamat. Ne kulkevat syyn suuntaisesti puun pinnassa ja johtuvat pintapuun kutistumisesta pakkasen vaikutuksesta ( vrt. luku 4.3.6).

### 2.2.2 Oksat

Oksia, erityisesti sisäoksia, pidetään puuaineen vikoina siksi, että ne ovat epäsäännöllisyyksiä puuaineessa. Ihanteellinen puuaines sisältää mahdollisimman vähän oksia. Niin kauan kuin oksa on elävä, se kasvaa kiinni ympäröivässä puussa. Elävä oksa on lähes saman väristä kuin runkopuu ilman selvästi havaittavaa rajaa. Oksien ympärille syntyy suuria jännityksiä, ja näin murtumat tulevat yleensä oksien läheisyyteen. Oksat alentavat puutavaran laatua luokiteltaessa. Puutavaran lujuuden aleneminen riippuu siitä, missä osassa rakennetta oksankohta on. Oksat kannattaa panna puristuspuolelle, sillä tällöin lujuus on 5 - 10 % suurempi, kuin jos oksat olisivat vetopuolella. Silti oksien lujuutta alentava vaikutus on usein huomattava./14/ Leikkauslujuutta ja poikittaista vetolujuutta oksat voivat sen sijaan kohottaa. Taulukossa 2.2 on esitetty oksien vaikutus männyn veto- ja puristuslujuuteen.



Taulukko 2.2 Oksien vaikutus männyn veto- ja puristuslujuuteen./29/

tiheys(kg/m <sup>3</sup> )		vetolujuus MN/m <sup>2</sup> vähennys(%)		puristuslujuus MN/m <sup>2</sup> vähennys(%)	
oksaton	500	78,0	-	40,3	-
vähän, pieniä oksia	530	38,4	51	36,1	10
paljon, suuria oksia	570	11,9	85	31,4	22

Oksien tiheys on suurempi kuin muun puuaineksen. Osa tiheyserosta johtuu oksien suuremmasta pihkapitoisuudesta, mutta myös itse puuaineen tiheys on suurempi. Pohjoismaisilla puulajeilla on oksien kuivatiheys noin kaksinkertainen runkopuun puuaineksen tiheyteen verrattuna./14/ Tästä johtuen myös oksien kutistumis- ja paisumisominaisuudet poikkeavat runkopuun ominaisuuksista. Tästä saat-  
taa aiheutua kuivausjännityksiä. Oksat kuivuvat muuta puuainesta nopeammin, sillä niiden syynsuunta on yleensä lähes suorakulmaisesti muun puun syihin nähden ja oksien alkuperäinen kosteus on muuta puuta vähäisempi. Erityisesti oksien poikittainen kutistuma on niin suuri, että oksat saattavat pudota pois kuivuttuan. Näin käy varsinkin kuolleille oksille.

### 2.2.3 Reaktiopuu

Kasvava puu reagoi pysyvään jännitykseen muodostamalla reaktiopuuta. Havupuiden reaktiopuu kehittyy puristusjännityksen puolelle ja siitä käytetään nimitystä lyly eli puristuspuu. Lehtipuiden vetojännitysten alais-  
ta puuta kutsutaan vetopuuksi.

Lylyä on tavallisesti kallistuneiden runkojen alapinnalla ja oksien alapuolella, siis puristusjännityksen puolella. Lylyn esiintyminen on yleistä. Lehtipuiden vetopuuta on kallistuneiden runkojen yläpinnalla ja oksien yläpinnalla, mutta sitä on havaittu myös muualla. Lehtipuissa vetopuun esiintyminen ei ole niin säännönmukaista kuin havupuiden lylyn.

Lyly on tummaa, kiiltävää, painavaa ja kovaa puuta. Lylypuun soluilla on erittäin suuri pituuden suuntainen kutistuminen, 6 - 7 % mikä tekee sen käytön hankalaksi rakenteissa./29/ Suurin haitta on siitä tehdyn sahatavaran vääntyminen ja halkeilu. Lisäksi lylyä on vaikea työstää sen kovuuden ja tiiviyn vuoksi. Lyly on yleensä noin 20 - 30 % tavallista puuta tiheämpää. Lujuuslajittelussa reaktiipuutavara menee alhaiseen lujuusluokkaan, näin myös tumman värinsä vuoksi. Lylyn käyttöä vaikeuttaa sen hauraus kuivattamisen jälkeen. Puristuslujuus ei sanottavasti muutu, mutta vetolujuus ja iskutaivutuslujuus ovat heikot. Taivutuslujuus on lylyllä muun puun luokkaa./14/

Lylyn soluissa on eroja terveeseen puuhun verrattuna. Vuosirenkaat koostuvat pyöreistä trakeideista, kun ne normaalipuulla ovat kulmikkaita. Joillakin lehtipuilla ovat lylypuun solujen sisäosat osittain tai kokonaan täyttyneet ligniinillä. Soluseinien paksuus on noin kaksinkertainen, mutta solujen halkaisija on pienempi kuin normaalipuulla. Trakeidit ovat 10 - 40 % lyhyempiä kuin normaalilla puulla./35/

Vetopuu ei poikkea normaalipuusta niin suuresti kuin lyly. Vetopuu on usein vaaleampaa kuin muu puu, mutta tämä pätee yleensä vain pohjoismaisille puulajeille. Vetopuu on kiiltävää ja tiivistä sekä normaalipuuta hiukan tiheämpää. Vetopuisen pinnan nukkaisuus haittaa sen käyttöä kosketeltavissa pinnoissa. Tuoreen vetopuun taivutuslujuus on tavallista alhaisempi. Ilmakuivan veto-



puun syynsuuntainen puristuslujuus on joko hiukan alhaisempi tai yhtä suuri kuin tavallisella puulla. Syiden suuntainen vetolujuus sen sijaan on erittäin korkea, samoin iskutaivutuslujuus. Vetopuun pituussuuntainen kurtistuma on usein jopa 1 %, mikä on huomattavasti suurempi kuin normaalipuulla. Vetopuu on ilmakeivana sitkeää ja jokseenkin normaalipuun veroista. Vetopuun solujen halkaisija on yleensä pienempi kuin normaalipuulla ja niiden pituus on suurempi. Soluseinät ovat paksumpia ja pyöreäkulmaisia.

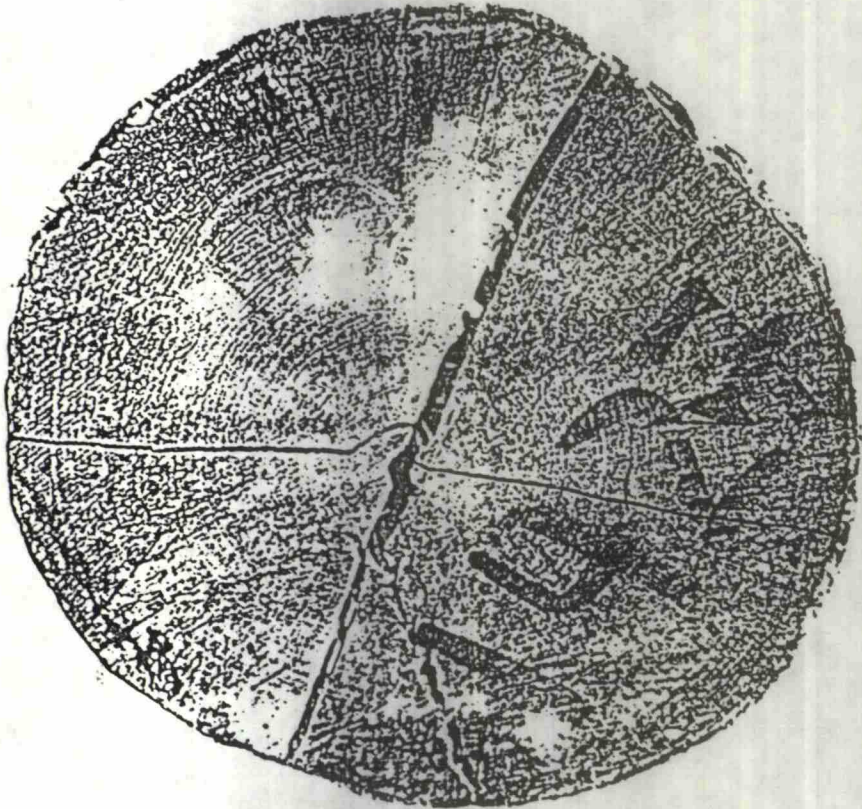
#### 2.2.4 Kasvujännitykset

Eläviin runkoihin syntyy soluseinän paksuntuessa solun lyhenemistäipumuksesta aiheutuvaa kasvujännitystä. Tämä aiheuttaa vähitellen puun sisäosiin pituuden suuntaista puristusjännitystä. Rungon ulkopinnalla vallitsee syiden suuntainen vetojännitys, tangentin suuntainen puristusjännitys ja säteen suunnassa vetojännitys.

Kasvujännitykset ovat lehtipuilla suuremmat kuin havupuilla. Suurimmat jännitykset ovat puristusjännityksiä, joiden suuruus voi suurilla lehtipuilla olla jopa 30 MPa. Nämä sijaitsevat puun rungon keskiosassa ja aiheuttavat sahatavaran vääntymistä. Puutavarassa, ehjissä tukeissa, saattavat kasvujännitykset säilyä jopa 20 vuotta./14/

Puristusjännitys saattaa aiheuttaa runkojen keskiosaan sydänhaurautta. Sydänhauraan puun mekaaninen lujuus on alhainen, mikä vaikeuttaa puutavaran käyttöä rakenteisiin. Puu, jossa on suuret kasvujännitykset, on alttiimpaa halkeamille. Nämä halkeamat muodostuvat erityisesti suuriin puihin ja kulkevat säteen suuntaisesti lähtien ytimeistä. Puun rungossa voi lisäksi esiintyä rengashalkeamia, jotka kulkevat vuosiluston reunalla.

Eniten haittaa halkeamista, olivat ne sitten säteen-, tangentin- tai pituussuuntaisia, on saha- ja vaneriteollisuudelle, koska ne heikentävät valmiin tuotteen lujuutta ja ovat haittana valmistusvaiheessa.



Kuva 2.3 Kasvujännityksistä johtuvia halkeamia 610 mm halkaisijaltaan olevassa tukissa./35/

### 2.3 Puulajien väliset erot

Pakkasen aiheuttama kutistuminen on lehtipuilla suurempaa kuin havupuilla, joten niihin syntyy helpommin pakkashalkeamia. Myös kasvujännitykset ovat lehtipuilla suuremmat, minkä seurauksena lehtipuinen sahatavara vääntyilee enemmän kuin havupuinen./14/

Puulajit, joilla on korkea ligniinipitoisuus, elävät kosteuden vaihteluiden seurauksena vähemmän kuin vähän ligniiniä sisältävät./35/ Tämä johtuu ligniinin alhaisesta hygroskooppisuudesta. Havupuilla on ydinsäteitä



yleensä noin 7 %, kun lehtipuilla niitä on keskimäärin 17 % tilavuudesta, ja ne ovat isompia kuin havupuilla. Suuret ydinsäteet ovat heikkoja ja niiden kohdalle syntyy helposti kuivumisen aiheuttamia halkeamia. Säteen suuntainen kutistuminen on runsaasti ydinsäteitä sisältävillä puulajeilla pienempää kuin muilla saman tiheyden omaavilla puulajeilla. Säteen suuntaisten ydinsäteiden seinämien kuidut ovat kohtisuoraan kutistumissuuntaa vastaan, joten ne vastustavat kutistumista. Muutamien puulajien ydinsädemäärä ja kutistuma säteen suunnassa on esitetty taulukossa 2.3. Hajaputkiloiset lehtipuut kutistuvat säteen suunnassa runsaasti ja niillä myös tilavuuskutistuminen on suurempaa kuin tiheyden perusteella oletettu. Tällaisia ovat mm. koivu, leppä, haapa ja pajut./26/

Taulukko 2.3 Eri puulajien ydinsädemäärät ja säteen suuntainen kutistuma./35//26/

puulaji	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	säteen suunt. kutistuminen (%)	ydinsäde- määrä (%)
Mänty	490	3,5	7,0
Pitchmänty	570	4,0	7,3
Pihkamänty	530	4,6	7,0
Tuija	360	2,1	3,4
Kuusi	460	3,7	7,1
Amerikan lehtikuusi	600	4,2	10,0
Valkotammi	760	5,4	28,0
Punatammi	670	4,0	21,4
Hopeavaahtera	660	3,0	17,9
Mustapyökki	900	7,8	23,5
Koivu	640	5,3	10,1

Eri puulajien kulumiseen sään vaikutuksesta vaikuttaa niiden tiheys. Kun tiheys on välillä 300 - 1000 kg/m<sup>3</sup>, on tiheyden ja eroosion suuruuden välillä lineaarinen riippuvuus./19/ Suomessa kasvavat puulajit kuuluvat tähän ryhmään.

Puun laatua arvioidaan vuosiluston paksuuden ja kesäpuuprosentin avulla. Vuosiluston paksuudesta voidaan paljain silminkin tehdä päätelmiä puun tiheydestä. Kesäpuuosuuteen vaikuttavat samat tekijät kuin vuosiluston paksuuteenkin: ravinteet ja kasvupaikka. Suomalaisen männyn kesäpuuosuus on noin 25 % ja kuusen jonkin verran pienempi, noin 15 %. Vaihtelu on erittäin suurta ja kyseiset prosenttiluvut ovat vain suuntaa-antavia. Kesäpuuprosentti on suurempi maan eteläosissa kuin pohjoisessa. Koivusta ja haavasta on vaikea mitata kesäpuun osuutta rajan epäselvyyden vuoksi./36/

Suomen puulajeista verrataan usein mäntyä ja kuusta toisiinsa. Artikkelin /49/ mukaan männyssä on vähemmän oksia kuin kuusessa. Lisäksi männyn oksat ovat yleensä ehjiä, kun taas kuusen käyttöä erilaisissa kosteudenvaihtelun alaisissa rakenteissa haittaa se, että oksat ovat usein halki ja ne ovat erittäin kovia, etenkin kuivatuksen jälkeen. Kuusen ja männyn kutistumaeroja kuvaa taulukko 2.4. Männyn ja kuusen kosteuskäyttäytymisessä on eroja: kuusen soluseinämien huokokset sulkeutuvat kuivatuksen aikana ja kosteuden siirtyminen poikkileikkaustason suunnassa on kuusella hitaampaa.



Taulukko 2.4 Kuusen ja männyn kosteusmuodonmuutokset./49/

Märästä uunikuivaksi	mänty	kuusi
- säteen suunta	4 %	3,6 - 4,2 %
- tangentin suunta	7,7 %	7,8 - 8,8 %
- pituussuunta	0,4 %	0,2 - 0,3 %
- tilavuus	12,4 %	12 %
Märästä ilmakeivaksi		
- säteen suunta	3 %	1,9 - 2,2 %
- tangentin suunta	4,5 %	4,0 - 5,0 %

Kuusen käyttöä puusepänteollisuudessa haittaa sen mäntyä suurempi taipumus kieroutua, eikä tulevaa muodonmuutosta pystytä yleensä ennakoimaan. Huonekaluteollisuudessa kieroutuvien kappaleiden määrä on kuusella 10 - 20 % ja männyllä noin 5 %./49/

### 3 VAURIOTYYYPIT

#### 3.1 Lahovauriot

Laho on lahottajasienen kemiallisesti tai fysikaalisesti muuttamaa puuta. Jotta laho syntyy, siis lahottajasieni pystyy toimimaan, on oltava kosteutta, sopiva lämpötila, ravinteita ja happea. On todettu, että sienirihmastoja pitkin jotkut sienet pystyvät kuljettamaan vettä ja kasvamaan muuten kuivassakin paikassa. Tällainen sieni on mm. lattiasieni, jota pidetäänkin vaarallisimpana sienenä juuri kosteudensiirto-ominaisuutensa vuoksi.

Lahottajasienet jaetaan valko- ja ruskolahottajiin. Valkolahottajan jäljiltä puuaineksesta on vaaleaa ja kuitumaista. Ruskolahottaja värjää puun ruskeaksi ja sen jäljiltä puu lohkokoutuu kuutiomaisesti kutistuessaan. Ruskolahottajiin katsotaan kuuluviksi myös katkolahottajat. Valkolahottajia on yleisimmin lehtipuissa, ruskolahottajat iskevät useimmin havupuihin./14/ Ruskolaho vaikuttaa suuresti puun lujuuteen, kun taas valkolaho vähentää lujuutta vain vähän./29/ Ruskolaho tuhoaa pääasiassa soluseinien hiilihydraatteja, eikä vaikuta ligniiniin eikä selluloosan kovimpiin osiin. Valkolaho tuhoaa sekä selluloosaa että ligniiniä, ja vaikuttaa näin puun lujuuteen./35/

Seuraavassa on lueteltu tavallisimmat lahottajasienet ja muutamia niiden ominaisuuksia./28//24/

#### Kellarisieni (Coniophora puteana)

- voimakas ja nopeakasvuinen, yleinen rakennusten lahottaja
- muodostaa puun pinnalle ruskeita rihmastojänteitä
- aiheuttaa ruskolahoa
- tarvitsee runsaasti kosteutta, ei pysty leviämään kuivaan puutavaraan



- optimiolosuhteet: ilman kosteus yli 95 %RH, puun kosteus yli 40 - 50 %, lämpötila 20 - 24 °C

**Lattiasieni** (*Serpula lacrymans*)

- elää hyvin vähällä kosteudella ja pystyy rihmastollaan kuljettamaan kosteutta muualta
- muodostaa harmaita rihmastojahteita
- itiöemät kookkaita, litteitä, ruskeita ja vaaleareunaisia ja ne levittävät runsaasti ruosteenruskeaa itiöpölyä
- kuuluu ruskolahottajiin
- optimiolosuhteet: lämpötila 15 - 20 °C, kosteus puussa 30 - 40 %, ilman kosteus 85 - 90 %RH

**Saunasieni** (*Gloeophyllum trabeum*)

- tarvitsee runsaasti kosteutta ja lämpöä
- optimiolosuhteet: lämpötila noin 35 °C
- säilyy hengissä kuivassa puussa jopa 10 vuotta

**Aidaskääpä** (*Gloeophyllum sepiarium*)

- kestää hyvin kuivuutta ja lämpöä
- kasvaa yleensä vanhoissa puurakenteissa ja aidoissa
- itiöemä ruosteenruskea ja rosopintainen

**Laakakääpä** (*Antrodia sinuosa*)

**Rivikääpä** (*Antrodia serialis*)

- aiheuttavat vaurioita kosteissa kellari- ja ullakko-tiloissa sekä ulkoverhouksissa
- vaativat runsaasti kosteutta, puun kosteuden oltava 30 - 40 %, jotta kasvavat
- muodostavat ohuen, valkean rihmastomaton

Lahon aiheuttama puun lujuuden aleneminen on haitallista ja estää usein puun käytön. Lujuuden alenemista havaitaan yleensä jo ennen painon alenemista. Laho vaikuttaa eniten iskutaivutuslujuuteen ja yleensä lujuus alenee nopeammin kuin painon menetys edellyttäisi. On todettu,

että alle 1 %:n painon pieneneminen lahon vaikutuksesta on merkinnyt jopa 16 %:n pienenemistä lujuudessa ja 5 %:n painon aleneminen jopa 50 %:n lujuuden alenemista, lahotajasta ja lujuuskokeesta riippuen./26/ Kutistuminen on voimakasta kuivatettaessa laho puu tuoreesta ilmakuiivaksi, mikä myös alentaa lujuutta. Ruskolaho aiheuttaa suuremman painon vähenemisen kuin valkolaho./29/

Puulajin luonnollisella lahonkestävyydellä tarkoitetaan sen kykyä vastustaa lahottajasienien pääsyä puuhun. Vaikka mikään puulaji ei ole täysin vastustuskykyinen lahottajasienille, on muutamilla puulajeilla erittäin hyvä lahottajien vastustuskyky. Erittäin lahonarkoja puulajeja ovat mm. leppä, haapa, koivu, jalava, vaahtera, poppeli, kuusi ja paju. Hyvin lahoamista vastustavat seetripuut, tammilajikkeet ja kataja./35/ Kuitenkin saman puulajinkin eri yksilöiden välillä on lahonkestävyydessä suuria eroja. Vaikuttavia tekijöitä ovat puun ikä, kasvunopeus, kasvupaikka ja lannoitus.

Puulajien lahonkestävyys on pääasiassa seurausta niiden sydänpuun sisältämistä myrkyllisistä aineista. Muitakin syitä on löydetty. Puun soluseinät muodostuvat monimutkaisista, liukenemattomista ja suuren molekyyli-painon omaavista polymeereista, joita lahottajasienten on vaikea tuhota. Lehtipuut ovat yleensä erittäin alttiita saamaan lahon. Niissä on vähemmän myrkyllisiä uuteaineita kuin havupuissa ja useissa lajeissa on makeaa mahlaa, joka edesauttaa lahottajasienien kasvua toimimalla ravintoaineena. Lehtipuiden putkiloissa lahottajasienten rihmastot mahtuvat kasvamaan paremmin kuin havupuiden trakeideissa. Havupuiden trakeidien halkaisija on keskimäärin 20 - 40  $\mu\text{m}$ , kun lehtipuilla putkilot ovat 0,02 - 0,03 mm halkaisijaltaan.



### 3.2 Home- ja sinistymävauriot

Homevaurioita ilmaantuu puun pinnalle ilman kosteuden ollessa pysyvästi yli 80 %RH ja ilmanvaihdon ollessa vähäistä. Homeet ovat usein kirkkaan värisiä: vihreitä, ruskeita, mustia, harmaita, keltaisia tai punaisia. Havupuissa home on tyypillisesti punaruskeata, kun se lehtipuilla on valkoista tai tummanruskeita täpliä tai viiruja./29/ Homesienten rihmasto kasvaa aivan puun pinnassa, ja puun kuivuessa sienikin kuivuu, mutta ei kuole, vaan kasvaa uudelleen kosteuden jälleen noustessa sienien vaatimalle tasolle. /23/ Home aiheuttaa puussa lähinnä vain vedenimeytymiskyvyn kasvua, mikä vaikuttaa puun kyllästyvyyteen. Homeen huokoistamasta pinnasta pinnoite kuluu myös helpommin pois.

Homeiden aiheuttama värjäätymä voidaan poistaa puun pinnasta harjaamalla tai höyläämällä. Jos alta paljastuva puu on tervettä, paikalla lienee ollut yksinomaan hometta, mutta usein on mukana myös lahottajasieniä, koska olosuhteet ovat niillekin otolliset.

Sinistäjä sienet värjäävät puun tavallisesti siniseksi tai harmaaksi, mutta myös vihertävää, vaaleanpunaista, keltaista tai lähes mustaa puuta on löydetty saman sieniryhmän vaivaamasta puusta./29/Itse sienet ovat ruskeita tai tummansävyisiä ja silmälle näkyvä väri johtuu valon taittumisesta rihmastossa. Elävissä puissa sinistymä on harvinaista./23/ Kaadettuihin tukkeihin sinistymää voi metsässä ilmaantua. Tällaista kutsutaan tukkisineksi.

Sienet käyttävät ravinnokseen soluontelon sokeri-, tärkkelys- ja proteiinipitoisia ravintoaineita, eivätkä yleensä tuhoa soluseinämiä. Tästä syystä sinistyneen puun mekaaninen lujuus ei ole oleellisesti huonompi kuin terveellä puulla. Sinistynyt puu ei ole tervettä puuta lahonarempaa. Usein sinistymän kanssa kasvaa kuitenkin

myös lahottajasieniä, sillä niiden kasvulle otolliset olosuhteet ovat yleensä samat kuin sinistäjille. Tästä syystä sinistynyttä sahatavaraa ei tulisi käyttää kantaviin rakenteisiin.

Vaikka sinistäjä- ja homesienet eivät vaikuta sahatavaran lujuuteen, on niiden aiheuttama taloudellinen menetys huomattava. Niiden aiheuttama esteettinen haitta on käyttäjiä ajatellen kiusallista. Homeen haju varsinkin asuinhuoneistoissa on epämiellyttävää. Allergikoille ja astmaatikoidelle saattavat sienien itiöt olla epäterveellisiä.

### 3.3 Halkeilu

Puurakenteen halkeilu voi olla vain pinnan halkeilua tai halkeamat voivat ulottua läpi koko rakenteen. Ulkona olevat suojaamattomat puurakenteet halkeilevat yleisesti pinnalta, kun massiivisiin puurakenteisiin esim. liimapuupalkkeihin tulevat halkeamat voivat ulottua palkin keskikohtaan asti. Vanhojen hirsitalojen hirret ovat aina erittäin halkeilleita. Halkeamat kulkevat poikkileikkauksessa säteen suunnassa ja pituussuuntaisessa sivussa keskellä hirttä. Halkeamat ovat usein erittäin syviä ja leveitä ja ulottuvat lähelle ydintä, mutta ne ovat osa hirsirakentamista ja sille luonteenomaisia, joten niitä ei pidetä vaurioina.

Puu turpoaa ja kutistuu kosteuden ja lämpötilan vaihteluiden mukaan. Pintoihin muodostuu tällöin jännityksiä, jotka puun lujuuden ylittyessä aiheuttavat halkeamia. Sydänpuun lämpö- ja kosteusliikkeet ovat huomattavasti vähäisempiä kuin pintapuulla. Lautojen päiden nopea kuivuminen ja kutistuminen tapahtuu muun puun ollessa korkeammassa kosteudessa. Jännitys kutistuneen pään ja muun osan välillä yleensä aiheuttaa pään halkeilua. Halkeamat saattavat sulkeutua kostuessaan, mutta tulevat takai-



sin taas pinnan kuivuttua. Jos jännityksen alainen sahatavara ei halkeile, jännitys purkaantuu kieroutumina ja vääntymisenä. Puutavaraa lämmittämällä voidaan jännityksiä laukaista./32/

Liimapuupalkkien halkeilu johtuu jännityksestä, joka ylittää lamellien poikittaisen vetolujuuden. Tämä voi tapahtua palkin päissä, lovien reunoilla, alapinnassa tai kaarevan palkin keskiosassa ylhäällä. Myös liitoselimien läheisyyteen tulee halkeamia, jos puulle ei ole jätetty riittävästi elämisvaraa.

Jos liimaus suoritetaan väärällä liimalla tai väärässä kosteudessa, saattaa tästä aiheutua lamellien irtoamista toisistaan. Oikein tehty liimapuurakenne on yleensä kuitenkin erittäin kestävä.

Puiset lattiat joutuvat suurille kosteudenmuutoksille alttiiksi ja puun kuivuessa lattiaan muodostuu rakoja. Jos puuta pidetään ennen asennusta asennusoloja vastavassa kosteudessa, voidaan rakojen muodostumista vähentää. Talvella sisäilma on usein niin kuivaa, että halkeilua tapahtuu. Kuivasta lattiamateriaalista saattaa myös irrota tikkuja ja sälöjä, jotka vaikeuttavat tilan asianmukaista käyttöä.

### 3.4 Eroosio

Sateen, tuulen, auringonvalon ja saasteiden aiheuttama eroosio eli puisen pinnan kuluminen riippuu puulajista, rakenteen sijainnista, ympäristöstä, rakenteen muotoilusta ja pinnan käsittelystä. Yleisesti ottaen pinnan kuluminen sään vaikutuksesta on hidasta. Eroosion on tutkimusten perusteella suomalaisilla puulajeilla arvioitu olevan vain sadasosa tai korkeintaan kymmenesosamillimetrejä vuodessa./16/ Tutkimusten /17/ ja /18/ mukaan eroosio on noin 6,3 mm vuosisadassa, mikä pe-

rustuu amerikkalaiseen tutkimusaineistoon. Suojaamaton puupinta pystysuorassa ja suoraan etelään päin kuluu tutkimuksen /19/ mukaan 2 - 5 mm vuosisadassa lehtipuilla ja 5 - 10 mm vuosisadassa havupuiden kevätpuussa.

Mitä tiheämpää puu on, sitä pienempi on sen eroosio. Eri puulajien eroosion suuruus riippuu aluksi puun uuteainepitoisuudesta. Mitä enemmän uuteaineita, sitä pienempi on eroosio. Mutta kun uuteaineet liukenevat, jatkuu eroosio kuten vähän uuteaineita sisältävillä puulajeilla./19/

Eroosion kannalta määräävin tekijä on puun soluseinien paksuus. Kevätpuu ohuempiseinäisenä kuluu enemmän kuin kesäpuu, mistä aiheutuu pinnan epätasaisuutta./19/

### 3.5 Muut vauriot

Laudoissa on usein vinosyisyyttä, mikä johtuu puun tyvekkyydestä. Voinosyisyyttä mitataan yleensä asteina verrattuna laudan suuntaan tai se voidaan ilmoittaa suhteena, esim. 1:10. Syiden suunnan poikkeaminen laudan suunnasta aiheuttaa taivutuslujuuden alenemista. Sen on todettu olevan 4 % syiden suunnan poiketessa laudan suunnasta 2°. Lujuuden aleneminen kasvaa vinouden lisääntyessä siten, että lujuuden menetys on 45 % vinouden ollessa 11°. Iskutaivutuslujuus on herkimmin pienenevä vinosyisyyden kasvaessa. Se pienenee 11°:n kulmalla 64 % suorasyisen puutavaran lujuuteen verrattuna. Puristuslujuuteen syynsuunnassa vinosyisyys vaikuttaa vähiten. Se pienenee ainoastaan 7 % syiden vinouden ollessa 11°./35/

Puun syiden kierteisyys saa aikaan lautojen kieroutumista ja taipumista. Kierteisyys tulee esiin myös hirsirakennusta rakennettaessa, sillä hirret eivät aina pysy suorina.



Vesisilo eli vettynyt sydänpuu vaikeuttaa sahatavaran kuivatusta, koska sen kosteuspitoisuus on huomattavasti muuta puuta suurempi, jopa satoja prosentteja. Vesisilo on usein jo kasvavassa puussa halkeillutta sekä säteen että tangentin suunnassa, mikä aiheutunee talvella tapahtuvasta jäätymisestä. Lahoamisella ei ilmeisesti ole tekemistä vesisilon kanssa, sillä normaalin sydänpuun ja vesisilon on todettu lahoavan samalla tavalla /14/.

#### 4 VAURIOITA AIHEUTTAVAT FYSIKAALISET TEKIJÄT

##### 4.1 Yleistä

Useimmissa puurakenteiden vauriotapauksissa on vaikea erottaa vain yhtä syytä vaurioon. Erilaisten syiden yhdistelmät ovat yleisiä. Jos puurakenne esimerkiksi kostuu, ei vaurioita tapahdu, jos rakenne pääsee kuivumaan niin nopeasti, että kostumisaika jää vaurioiden syntymisen kannalta liian lyhyeksi. Umpinaisessa tilassa kostea puu on hyvä kasvupaikka homeille ja lahottajasienille.

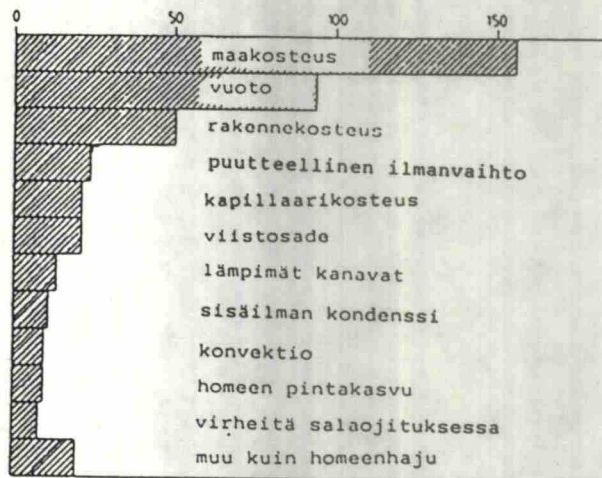
Tutkimuksen /24/ mukaan on Suomessa vuosina 1970 - 84 tutkituista lahovaurioista lähes 60 %:ssa syynä ollut vesivaurio, putkivuoto. Loput 40 % on aiheutunut rakennevirheestä tai kosteusvuodosta höyröyksen läpi sellaiseen tilaan, josta kosteus ei ilman virtauksen avulla kulkeudu pois. Tutkitussa aineistossa olivat lattiarakenteiden vauriot selvästi yleisimpiä, niitä oli 42 % kaikista. Tapauksia, joissa oli lattiarakenteen vaurio yhdessä muiden rakennusosien vaurioiden kanssa, oli 66 %. Hyvin pahoja, koko rakennuksen käsittäviä vaurioita oli alle kaksi prosenttia tutkitusta aineistosta.

Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan tärkeimpiä rakennusten vaurion aiheuttajia ovat rakennekosteus, puutteellinen ilmanvaihto kostuvassa rakenteessa, kapillaarinen imu ja viistosade. Kuvassa 4.1 on tulokset Ruotsissa Valtion koestuslaitoksessa tehdystä tutkimuksesta sekä Lundin Teknillisen Korkeakoulun tutkimuksesta. Teoksessa ei mainita, mikä osuus tutkituista rakennuksista on pelkästään puurakenteisia.

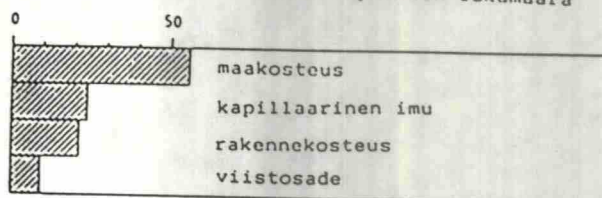
Liitteessä 1 on esitetty yhteenveto rakenteissa esiintyvistä kosteuspitaisuuksista ja lämpötiloista. Se perustuu ruotsalaiseen tutkimusaineistoon./47/



VAURION SYY vauriotapausten lukumäärä



VAURION SYY vauriotapausten lukumäärä



Kuva 4.1 Kosteuden aiheuttamien vaurioiden syyt eriteltynä. Yllä Ruotsin Valtion koestuslaitoksen mukaan ja alla Lundin Teknillisen Korkeakoulun mukaan./47/

## 4.2 Puun kosteuspitoisuus

### 4.2.1 Suuri kosteus

Puun turpoaminen ja kutistuminen tapahtuvat pääosin solujen hemiselluloosa- ja ligniiniolosassa, sillä selluloosa reagoi vähemmän kosteudenmuutoksiin. Puun kosteusliikkeiden mallintamisessa selluloosan osuus yleensä jätetään kokonaan huomioon ottamatta. Näin saadaan tehtyä tarpeellisia yksinkertaistuksia hankaliin lausekkeisiin. Kosteuden ollessa alle puunsyiden kyllästymispisteen ei

vapaata vettä ole soluonteloissa, mutta kosteuden kasvaessa alkaa vettä keräntyä myös sinne. Puu voi sisältää kosteutta puukappaleen painoon verrattuna moninkertaisesti. Puuhun imeytyvän kosteuden määrä riippuu puulajin huokoisuudesta, sillä puunsyiden kyllästymispisteen kosteuden yläpuolella vettä voi olla enintään soluonteloiden tilavuuden verran. Huokoisimpia puulajeja ovat mm. balsa ( $170 \text{ kg/m}^3$ ) ja quipo ( $160 \text{ kg/m}^3$ ), kun suurimpia tiheydet ovat mm. akaasialla ( $1110 \text{ kg/m}^3$ ) ja ebenpuulla ( $1230 \text{ kg/m}^3$ ).

Jos puurakenne on täysin vedellä kyllästetty ei siihen tule lahottajasieniä, koska niiden tarvitsema happi puuttuu. Mutta mikäli rakenne on vain paikallisestikin kuivempana, on lahoamisvaara olemassa.

#### 4.2.2 Alhainen kosteus

Puun lujuudet ovat suurimmillaan 4 - 12 %:n kosteudessa. Vaihtelua aiheuttaa puulajin tiheys ja puun eri osa-aineiden suhteet. Liian kuiva ilma on haitallista puurakenteille. Kuivuminen saa aikaan kiertymistä, taipumaa ja vääntymistä sekä ei-toivottuja halkeamia.

Koska kevät- ja kesäpuun tiheydet ovat erilaiset, ne kuivuvat ja kutistuvat erilailla. Ja kun vielä puun ominaisuudet ovat eri suuntiinkin erilaiset, syntyy puuhun kuivumisjännityksiä. Kutistuminen tangentin suunnassa on suurempi kuin säteen suunnassa, se voi olla jopa yli kaksinkertainen. Kuivuvan puun pinta tulee epätasaiseksi ja vuosilustot saattavat irrota toisistaan. Kerran irrottuaan ne eivät enää tartu kiinni toisiinsa, vaikka kosteassa saattaakin näyttää siltä./46/ Puun syiden irtoaminen ei terveellä ja oikein käsitellyllä puulla ole merkittävä vaurion aiheuttaja. Sen sijaan jos sahatavara on kosteana jäänyt, ollut myrskypuuta tai kuivatettu väärin, on syiden irtoaminen eli tikkuuntuminen

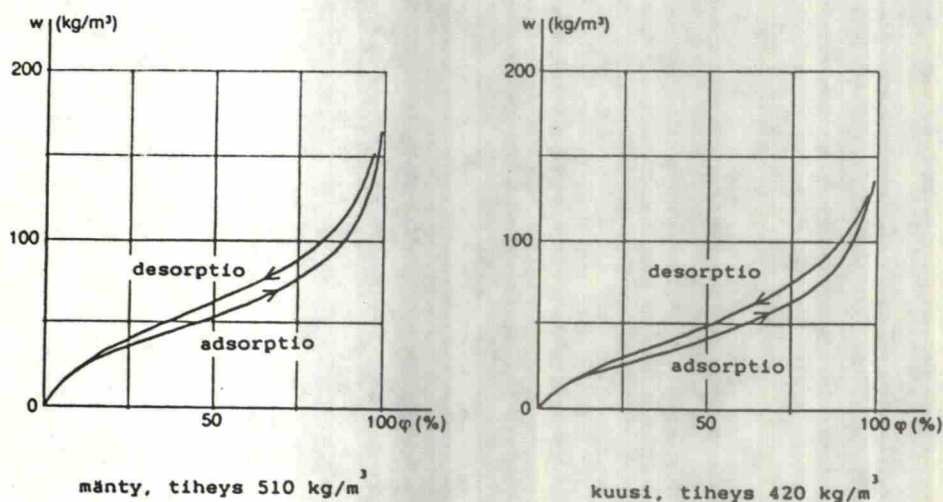


yleisempää./45/ Puisissa lattioissa on kuivuminen havaittavissa varsinkin talviaikana, jolloin sisäilman kosteus saattaa laskea jopa 20% RH:een.

#### 4.3 Kosteuspitoisuuteen vaikuttavat tekijät

##### 4.3.1 Kosteuden vaihtelu

Puurakenne pyrkii kosteuden vaihdellessa aina kulloisenkin tilanteen mukaiseen tasapainokosteuteen. Siihen vaikuttaa ympäristön suhteellinen kosteus, sekä puun kosteushistoria. Tasapainokosteus ei riipu lineaarisesti ilman suhteellisesta kosteudesta, vaan sitä kuvaava käyrä eli sorptiokäyrä on S:n muotoinen. Kuvassa 4.2 on esitetty kuusen ja männyn desorptio- ja adsorptiokäyrät. Puun tasapainokosteuteen liittyy hystereesi-ilmiö. Sillä tarkoitetaan sitä, että kuivuvan puun tasapainokosteus tietyssä suhteellisessa kosteudessa on suurempi kuin kostumassa olevan puun tasapainokosteus.



Kuva 4.2 Adsorptio-desorptio -käyrät kuuselle ja männylle./48/

Alkuperäinen desorptio puulla, jota ei ole aikaisemmin kuivattu, on aina sen desorptiokäyrän alapuolella, suhteellisen kosteuden ollessa yli 60 %, joka on saatu, kun puuta on peräkkäin kuivattu ja kostutettu useita kertoja. Kosteuspitoisuus vaihtelee ulkonaolevissa rakenteissa voimakkaimmin. Sisä rakenteiden kosteudenvaihtelut johtuvat käytöstä. Urheilutiloissa kosteus nousee pelitilanteissa ja laskee taas ihmisten poistuttua. Kyseiset kosteudenvaihtelut ovat kuitenkin niin nopeita, etteivät ne vaikuta puun kosteuteen, sillä tasaantuminen vaatii muutamia viikkoja, olosuhteista ja poikkileikkauksen koosta riippuen. Tasaantuminen tapahtuu alhaisissa kosteuksissa nopeammin kuin korkeissa kosteuksissa.

#### 4.3.2 Rakenteeseen kertyvä kosteus

Puuhun kertyvä kosteus aiheuttaa vaurioita lähinnä ylä- ja alapohjissa. Jos kosteutta kerääntyy rakenteeseen ja se tuulettuu pois, ei rakenne vaurioidu. Mikäli riittävää tuuletusta ei ole järjestetty, aiheuttaa rakenteeseen kertyvä kosteus home- ja lahovaurioita. Jos yläpohjan höyrysulku on ehjä ja huolella asennettu, ei kosteutta pääse huonetilasta yläpohjaan. Vuodon tapahtuttua on vaurioalttius kiinni tuulettuvuudesta, sillä kosteus tiivistyy aluslaudoituksen alapintaan.

Erityisesti katon läpivientien ympärille saattaa syntyä tuulettumaton tila, mikäli läpivienti katkaisee kattokannattajien suuntaisen ilmavirtauksen. Jos vielä samassa koolausvälissä on kaksi läpivientä, ei niiden välinen tila tuuletu, vaikka tuuletusaukkoja olisikin ympäri rakennuksen./3/ Näin erityisesti umpinaisilla kannattajilla, kuten vaneriumapalkit. Tasakaton tuuletusaukkojen minimimäärän on monta vuotta kattokorjauksia tehneen ammattimiehen mukaan oltava vähintään sellaista pinta-alaa vastaava, jos ajatellaan koko rakennuksen piirille 1 cm korkea tuuletusrako.



Aukkojen tulisi olla sijoitettu siten, että ilmavirtaus tapahtuu läpi yläpohjan, ei kulmassa nurkan toiselta puolelta toiselle.

Tasakaton tuuletusaukkojen määrää voidaan verrata myös kattopinta-alaan. Jo noin 1 % kattopinta-alasta olevat tuuletusaukot riittävät tarpeelliseen tuuletukseen /3/. Teoksen /51/ mukaan voi puun kosteus huonosti tuuletetussa yläpohjassa nousta jopa yli 70 %:n. Erityisen alttiita vaurioille ovat katot, joiden sekundäärit ovat ohutuumapalkkeja. Lämpöeristeen yläpuolisen tilan tuuletusilman sisääntuloaukkojen tulee sijaita mahdollisimman alhaalla ja niiden vähimmäispinta-ala on tämän mukaan  $15 \text{ cm}^2/\text{m}^2$  -yläpohjan pinta-ala. Osa aukoista tulee ajatella poistoaukoiksi ja ne tulee tehdä mahdollisimman korkealle. Niiden suositeltava määrä on  $25 \text{ cm}^2/\text{m}^2$  -yläpohjan pinta-ala.

Tuuletuksen kannalta tärkeä tekijä on yläpohjan ilmaväli, siis tila yläpohjaeristeen ja kattolaudoituksen välissä. Tasakatoissa vielä noin 50 mm:n raossa ilma virtaa, mutta sitä pienemmissä ei, jolloin rakenne ei tuuletetu./3/

Kosteuden tiivistyminen tuulettumattomassa yläpohjassa voi olla jopa yli satakertainen tuuletettuun yläpohjaan verrattuna /4/. Kosteus keskittyy lähinnä eristekerroksen yläosaan ja jää alaosassa hyvin alhaiseksi. Kostean eristeen lämmönjohtavuus on suurempi kuin kuivan, joten rakennuksen energiankulutus kasvaa. Kyseisissä kokeissa tiivistyi kosteutta selluvillalla eristettyyn yläpohjaan  $2-4,9 \text{ g}/(\text{m}^2 \times 44\text{h})$  ja kivivillalla eristettyyn  $17,4 - 102,6 \text{ g}/(\text{m}^2 \times 44\text{h})$ . Tuuletetuissa vastaavissa yläpohjissa arvot olivat 10...100:s osa edellämainituista arvoista. Etelänpuoleisella lappeella kosteutta tiivistyi selvästi vähemmän kuin pohjoislappeella, mikä johtui pohjoispuolen katteen alemmasta lämpötilasta.

Ilmanvaihdon minimiarvoksi on tässä ehdotettu 1,8 - 5,1 kertaa/h , mikä vastaa raossa tapahtuvaa savupiippuvaikutuksen aiheuttamaa ilmanvaihtoa. Myös koneellista tuuletusta voidaan käyttää ilmanvaihdon tehostamiseksi, mutta vaarana on, että näin imetään kosteaa sisäilmaa rakenteisiin ja aiheutetaan kosteusvaurio. Näin käy varsinkin silloin, jos höyrynsulku on huonosti asennettu tai puutteellinen./51/

Ryömintätilassa alkaa lahottajasienten kasvu helposti, mikäli tuuletuksesta ei ole huolehdittu. Suhteellisen kosteuden on oltava alle 85 %RH./53/ Tuuletusaukkoja tulee olla 0,3 - 0,5 m korkeassa puurakenteisen talon ryömintätilassa  $0,05 \frac{m^2}{100 m^2}$  välipohjaa, milloin rakennus on tuulelle alttiissa paikassa. Tuulelta suojatussa paikassa määrä on  $0,10 \frac{m^2}{100 m^2}$  välipohjaa. Tuuletusaukkojen sijainti on valittava siten, että ryömintätila tuulettuu kauttaaltaan. Aukkoja on tehtävä myös sisäisiin sokkeleihin. Maasta nousevan kosteuden määrää voidaan vähentää salaojituksella tai muovikalvolla, jonka päällä on ohut sorakerros painona./53/

Ulkoseinien lämmöneristeen kostuminen sadevesien vaikutuksesta estetään parhaiten tekemällä ulkoverhouksen taakse tuuletusrako. Lämmöneristeen ulkopuolella on oltava tuulensuoja ja sisäpuolella höyrynsulku. Tuuletusraon tulee joka kohdasta olla auki, niin että ilma pääsee virtaamaan esteettömästi.



#### 4.3.3 Pinnoite

Pinnansuojausaineet voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: paksun kalvon muodostavat aineet (maalit ja lakat), ohuen kalvon muodostavat aineet (kuullottavat maalit) sekä pinnansuojausaineet./5/ Pinnansuojausaineiden suojaava vaikutus perustuu siihen, että ne sisältävät sienille myrkyllisiä aineita ja ehkäisevät sienien kasvua. Ajan mittaan sienimyrkyt haihtuvat osittain ja huuhtoutuvat pois, jolloin suojauksen teho heikkenee. Ne voivat sisältää myös aineita, joilla on tarkoitus saada pinta vettä hylkiväksi. Maalit ja lakat sensijaan muodostavat puun pinnalle vettä hylkivän kalvon, mitä pinnansuojausaineet eivät tee. Maalin ja pinnansuojausaineen välimuoto ovat kuullottavat maalit, joiden vaikutuksesta pintaan muodostuu kalvo, mutta myös puun sisään tunkeutuu osa aineesta./5/ Kuullottavat maalit jättävät puun syykuviot näkyviin.

Huokoisia puunsuoja-aineita käytettäessä kosteus pääsee puuhun helposti. Koska pinta ei ole tiivis, kosteus myös haihtuu nopeasti. Puunsuoja-aineet tehdään mahdollisimman joustaviksi, jotta ne pystyvät seuraamaan puun turpoamista ja kutistumista. Ne estävät pinnan kosteusvaihte-luita huonommin kuin kalvon muodostavat maalit.

Maalit voidaan jakaa ryhmiin niiden sisältämän sideaineen mukaan. Sideaineet voivat olla synteettisiä polymeerejä tai eri tavoin muokattuja luonnonmateriaaleja. Kosteudenläpäisevyyteen vaikuttaa maalin ainesosista eniten juuri sideaine. Sen merkitys on suuri myös maalikalvon tarttuvuuden, sen kemiallisten ominaisuuksien ja sisäisen lujuuden kannalta./6/

Puun ulkomaalauksessa käytetään alkydi-, öljy- ja lateksipohjaisia maaleja. Niillä on hyvät kiilto- ja värinsäilymisominaisuudet sekä kestävyys. Alkydimaalit ovat kimmoisia, sään- ja vedenkestäviä ja tarttuvat hyvin

alustaansa. Öljymaali kuivuu nopeasti ja kovettuu jälkeensä muodostaen erittäin tiiviin pinnan. Lateksimaalien sideaineina käytetään polyvinyylihartseja ja polyakrylaatteja, joiden johdosta niillä on hyvä säänkesto sekä vedenläpäisevyys.

Erityisesti ikkunat ja julkisivut joutuvat sään rasituksille alttiiksi. Pääasiallisin ikkunoiden kosteudenlähde on sade. Sadevesi valuu pitkin lasin pintaa alakarmiin ja imeytyy puuhun halkeamien, avautuneiden saumojen tai irronneen kittauksen kautta. Imeytyminen voi tapahtua kapillaarisesti kapeissa, alle 0,5 mm:n raoissa tai paine-erojen seurauksena ulkopuitteen ollessa liian tiivis. Pinnoitteen ollessa tiivis vesi ei imeydy puuhun, mutta vaurioituneesta kohdasta puuhun imeytynyt vesi ei myöskään pääse poistumaan pinnoitteen läpi.

Vaikeuksia pinnoituksessa esiintyy yleensä aina, sillä puu on epähomogeeninen maalausala, eikä maali- tai lakkakalvo kestä. Vaikeutena on aineiden epätasainen tunkeutuminen puuhun. Kevätpuu imee maalia tai lakkaa enemmän kuin tiivis kesäpuu, jolloin vuosirenkaiden rajalle syntyy jännityksiä kalvon paksuuden vaihtuessa nopeasti./7/ Pinnoitteen kuplimista ja halkeilua esiintyy tällä alueella useammin kuin muualla./8/ Maali tarttuu huonommin kesäpuuhun, koska mekaaninen adheesio on siinä pienempi kuin kevätpuussa./9/ Sahapintainen puu imee enemmän maalia kuin höylätty, samoin poikkileikkauspinta enemmän kuin puun pituussuuntainen pinta. Maalattava puulaji vaikuttaa myös pinnoitteen imeytymiseen ja tartuntaan. Kuultokäsiteltäessä kuudessa ei esiinny värieroja ja imeytymistä yhtä paljon kuin männynsä ja kuusi on huomattavasti helpompi käsitellä kuin mänty./56/

Sillä on suuri merkitys, miten nopeasti puupinta käsitellään käyttöönoton jälkeen. Puupinta olisi maalattava mahdollisimman nopeasti peittäväällä maalilla, jos maalil-



le halutaan pitkä kestoikä. Jos pinta oli maalaamatta puoli vuotta ennen maalausta, se kaipasi uusintakäsittelyä jo viiden vuoden kuluttua. Jos pinta oli ollut maalaamattomana tai kuullotettuna neljä vuotta, se kaipasi uusintamaalausta jo noin kolmen vuoden kuluttua. /10/ Hyvä maalaus saattaa kestää 7 - 10 vuotta./16/

Eräät puulajit, kuten tiikki, voivat rasvaisuutensa ja hartsipitoisuutensa takia aiheuttaa ongelmia pintakäsittelylle. Näitä ovat haitalliset värinmuutokset ja tarttuvuusongelmat./30/

Puuta voidaan suojata myös muodonmuutoksia vastaan. Tätä kutsutaan dimensiostabiloinniksi. Tällöin puun pinta tehdään mahdollisimman vedenpitäväksi, jottei kosteus tunkeudu puuhun. Toinen tapa on imeyttää tai puristaa paineen avulla stabilointiainetta puuhun. Tällöin se tila, johon vesi muuten puussa tunkeutuisi, on täytetty aineella. Kosteusmuodonmuutokset ovat näin erittäin pienet. Tietyillä puulajeilla on onnistuttu paisumista vähentämään jopa yli 80 %./29/ Dimensiostabiloidulle puulle löytyisi käyttökohteita eri teollisuudenaloilta, mutta toistaiseksi aineiden kalleus rajoittaa sen valmistamista.

#### 4.3.4 Kontakti ja kosteus

Puurakenteen kontaktivaurio on usein seurausta kostean betonin tai tiilen ja puun joutumisesta kiinni toisiinsa. Kosteutta voi tulla rakenteeseen jo rakennusvaiheessa esim. sadesäällä, mutta betonin rakennekosteuskin haihtuu ympäristöön. Rakenteisiin tulee vettä myös maaperästä kapillaarisesti tai roiskevesistä sokkeleihin. Suoranainen vesivaurio, putkien hajoaminen tai vesivahinko voi tuoda rakenteisiin vettä. Varsinkin puurunkoisten omakoti- ja rivitalojen seinien alajuoksut ovat paikassa, jossa kastuneen puun kuivuminen on lähes mahdotonta.

Kontaktin aiheuttama vaurio syntyy myös silloin, jos toinen materiaali on kiinni puussa ja estää sen kuivumisen.

Yläpohjassa olevien puurakenteiden kosteuteen vaikuttaa eriste ja sen kosteuspitoisuus. Eri eristeillä on erilainen kosteuskapasiteetti, mistä niiden kosteudensitomiskyky riippuu. Mineraalivillalla on pieni tasapainokosteus, alle 0,5 %, jolloin kosteus sitoutuu puurakenteisiin. Selluvillan tasapainokosteus on 13 %, joten se sitoo itseensä kosteutta alentaen näin puurakenteisiin ja katteeseen tiivistyvää kosteutta. Selluvillankin kosteudensitomiskyky on rajallinen ja riippuu kosteuskuormituksesta./4/

Eri materiaalien huokoisuus ja huokoskokojakauma vaikuttavat niiden väliseen veden imeytymiseen sekä määräävät materiaaliin mahtuvan veden määrän ja kapillaarisen vedenimun suuruuden. Pienihuukoilla aineilla on suuri kapillaarinen imukyky, mutta pieni virtausnopeus, suuri huukoilla aineilla päinvastoin. Huokosten koko vaikuttaa siten, että 5 kertaa halkaisijaltaan suurempien huokosten kautta menee läpi 125 kertaa enemmän vettä./89/ Materiaalien ollessa kiinni toisissaan imee pienihuokoisempi vettä itseensä viereisen materiaalin isommista huokosista.

Kuusen trakeidien halkaisija on keskimäärin 30 - 40  $\mu\text{m}$ , mutta vaihtelu on suurta, ja kaiken kokoisia huokosia on samassa poikkileikkauksessa. Jos trakeidien seinämien huokoset jaetaan neljään lähes yhtäsuureen osaan, yksi neljännes on halkaisijaltaan alle  $2,4 \cdot 10^{-6}$  mm, toinen neljännes välillä  $2,4 - 8,0 \cdot 10^{-6}$  mm, kolmas neljännes välillä  $8,0 - 28 \cdot 10^{-6}$  mm ja loput 1/4 suurempia kuin  $28 \cdot 10^{-6}$  mm./90/ Betonin huokosista noin 1/3 on 0,1 - 0,50  $\mu\text{m}$  halkaisijaltaan ja noin 60 % alle 0,1  $\mu\text{m}$ , mutta silläkin eri huokoskoalueille osuu jokaiselle yleensä muutama prosentti huokosista, vaihdellen betonin koostumuksen mukaan. Tiilen huokosista noin 75 % on alle 0,5  $\mu\text{m}$ .



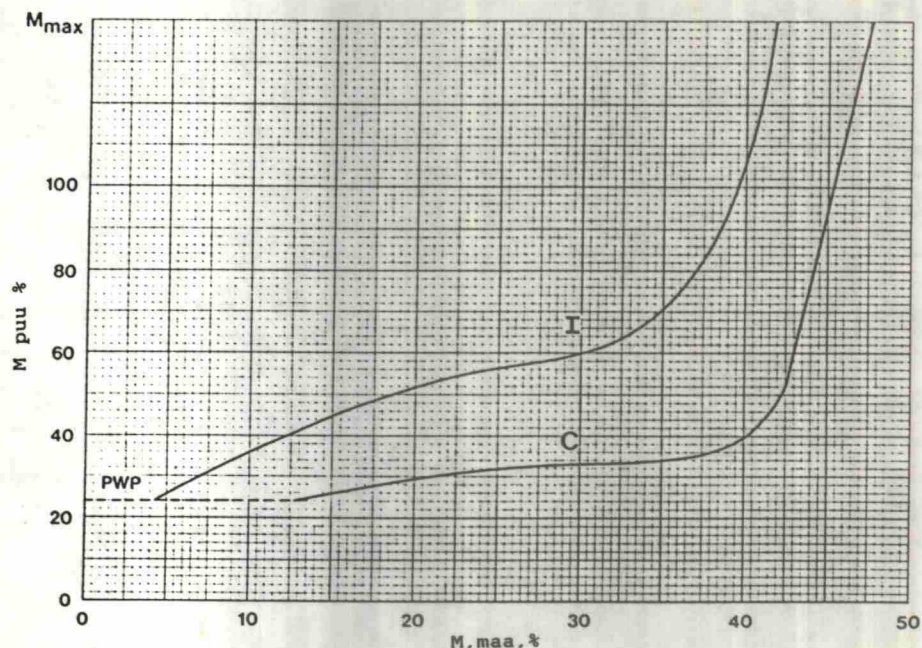
Liitteessä 2 on esitetty TKK:n betonilaboratorion elohopeaporosimetrillä määritetyt mäntypuun ja betonin huokoskokojakaumat.

Maakosketuksessa olevat puukappaleet joutuvat jatkuvasti olemaan kosteassa tilassa. Mitä syvemmällä puurakenne on maassa, sitä pitempiä aikoja se on yhtäjaksoisesti märkänä. Kaikissa aita- ja laiturirakennelmissa sekä puhelinpylväissä pääsee kosteus nousemaan puun syiden suunnassa. Kyseisiin rakennelmiin käytetäänkin lähes yksinomaan painekyllästettyä puuta.

Kyllästettyä puutavaraa käytetään kaikissa kosteuden kanssa kosketuksiin joutuviissa puurakenteissa. Sellaiset rakenteet, jotka on hankala vaihtaa kosteusvuodon tapahduttua, tehdään varmuuden vuoksi kyllästetystä puutavarasta. Tällaisia ovat mm. pientalojen puisten seinärakenteiden alajuoksut. Erilaiset ulkorakenteet tehdään poikkeuksetta kyllästetystä puutavarasta.

Kun puu on kosketuksessa maaperän kanssa, saavutetaan kosteustasapaino kummankin veden potentiaalin ollessa yhtäsuuret. Kuvassa 4.3 on esitetty puun ja maan kosteuskäyttäytymistä kuvaavat käyrät eli sorptioisotermit maalajin kosteuspitoisuuden funktiona.

Kuvasta 4.3 huomataan, että puun kosteuspitoisuus ylittää arvon 20 %, jolloin lahoaminen alkaa jo alhaisilla maalajien kosteuspitoisuuksilla.



Kuva 4.3 Puun sorptioisotermit sen ollessa kosketuksessa kahden eri maalajin kanssa. I=Indio loam(hiekansekainen savi) ja C=China clay(savi)/43/

#### 4.3.5 Muut kontaktit

Puurakenteissa olevien metallisten kiinnikkeiden ruostuessa ja ruosteveden valuessa pitkin puun pintaa tulee valumakohtaan värivaurioita. Kiinnike myös edistää veden kerääntymistä yhteen paikkaan, mikä on näin alttiimpi liiallisen kosteuden aiheuttamalle vauriolle. Myös homehtuminen ja mustien täplien ilmestyminen alkavat usein metallisen kiinnikkeen ympäriltä.

Kyllästetyn puutavaran ja metallisten kiinnikkeiden vaurioalttius riippuu sekä kyllästysaineesta että metallista ja sen pintakäsittelystä. Tutkimuksessa /39/ vähiten korroosiota havaittiin kreosoottikyllästetyssä puussa olleissa metalliosissa ja eniten sinkki-kromi-arseeni-tyyppisellä suolalla kyllästetyissä koekappaleissa. Tärkeätä on, ettei kyllästysaine sinänsä ole agressiivi-



nen metallin kanssa. Kaikilla eri metalleilla havaittiin vähiten väri- ja korroosiovaurioita kreosoottikyllästeissä puissa. Vertailukoekappaleena ei kuitenkaan ollut käsittelemätöntä puuta, joten siltä osin tutkimus ei anna tietoa.

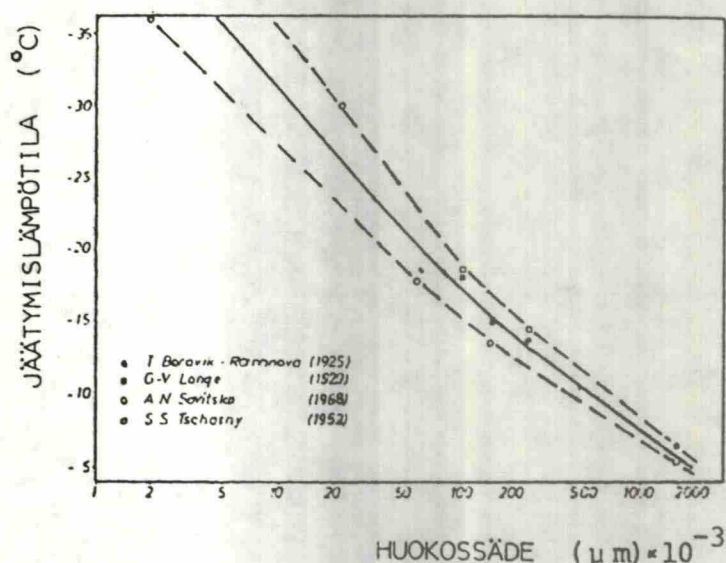
#### 4.3.6 Puun sisältämän veden jäätyminen

Nesteiden virtaus puussa vähenee lämpötilan laskiessa. Kun lämpötila laskee pakkasen puolelle, jäätyy puuaineksessa oleva vesi ja sen tilavuus kasvaa 9 %. Kosteuspitoisuuden ollessa yli puunsyiden kyllästymispisteen, mutta siten, että soluissa on vielä vedellä täyttymätöntä tyhjää tilaa, laajenee vesi tähän tilaan aikä aiheuta tilavuudenmuutoksia. Mikäli solut ovat täynnä vettä, puu laajenee muutaman prosentin veden jäätyessä./58/ Vesi ei jäädy kuitenkaan kokonaan, sillä jäätyneiden osien välissä on paineellista jäätyvätöntä vettä.

Selvimmin veden jäätyminen on havaittu kirjaamalla vapautuvaa reaktiolämpöä. Teoksessa /37/ on selvitetty talvella tapahtuvaa puuaineksessa olevan veden jäätymistä. Nestefaasissa olevan veden jäätyminen jäätymispisteen alapuolella tapahtuu muutaman sadasosa-asteen pakkasessa kaikilla testatuilla puulajeilla, koska siihen liuenneiden uuteaineiden pitoisuus on pieni. Trakeidisoluissa oleva vesi jäätyy helposti, mutta soluseinässä oleva sidottu vesi ei välttämättä jäädy.

Puilla katsotaan teoksen /37/ mukaan olevan kolme erilaista tapaa selviytyä talven jäätymisestä. Ensinnäkin kehäputkiloisilla puulajeilla on niin suuret ja tehokkaat solut, että latvuskin täyttyy vedellä ja uudet solut valmistuvat vasta ennen lehtien tuloa keväällä. Toinen tapa on poistaa ilmakuplat suuren juuripaineen avulla. Kolmas tapa selitetään sillä, että vain trakeidisoluja tai suhteellisen pieniä soluja sisältävän puun solut eivät pak-

kasen vaikutuksesta helposti tukkiinnu. Kuvassa 4.4 on esitetty veden jäätymislämpötilan riippuminen huokossäteestä lasikapillaareissa, joita voidaan verrata myös puun kapillaareihin. Kuvasta havaitaan melko jyrkkä jäätymislämpötilan aleneminen huokossäteen pienentyessä.



Kuva 4.4 Veden jäätymislämpötilan ja huokossäteen välinen riippuvuus lasikapillaareissa eri tutkijoiden mukaan./70/

Havupuilla jäätyminen ei oleellisesti lisää virtausvastusta. Lehtipuilla muodostuu paljon pieniä ilmakuplia veden jäättyessä nopeasti. Hitaampi jäätyminen saa aikaan vähemmän ja suurempia ilmakuplia. Joka kerta, kun jäätyminen tapahtuu, jäätyy 9% vedellä täyttyneistä trakeideista ja ne jäävät pois veden kuljetuksesta. Arvio on melko korkea, varsinkin kun otetaan huomioon talvella tapahtuva vaihteleva sulaminen ja jäätyminen./37/

Sekä jäätyminen että ilmakuplien muodostuminen kasvattavat tilavuutta. Siksi on havaittu myös paikallista paineen nousua puussa. Kun sulaminen alkaa, tämä korkeampi paine auttaa ilmakuplien liuottamisessa. Mitä pienempiä ilmakuplat ovat, sitä nopeammin ne liukenevät. Tietty määrä puuaineksen kosteudensitomiskyvystä häviää joka



talvi ja häviö on sitä pienempi, mitä pienemmät ovat solut.

Pakkanen aiheuttaa puuhun joko säteen tai syynsuuntaisia halkeamia. Niiden syntyessä puun pinnalla vallitsee tangentin suunnassa niin suuri vetojännitys, että puun vetolujuus ylittyy. Säteen suuntaiset halkeamat johtuvat soluista, jotka ovat jäätyneet kasvuvaiheessa tai sisältävät normaalia leveämpiä ydinsäteitä, eivätkä kestä suurta vetoa./35/ Pituushalkeamia esiintyy eniten vanhojen puiden tyvessä. Ne muodostuvat usein haavakudoksen ympärille, sillä kudosis on yleensä niin heikkoa, että sen solut katkeavat seuraavan talven pakkasissa.

Pakkashalkeamien syistä on esitetty erilaisia teorioita. Eräs teoria perustuu siihen, että puun ollessa hyvin kylmässä sen alhainen lämmönjohtavuus saa aikaan, että pinta jäähtyy nopeammin kuin sisäosa. Tästä erilaisesta kutistumisesta aiheutuu pintaan vetojännitys, mikä purkaantuu halkeamina. Toinen teoria väittää, että tuulen mekaaninen rasitus jäätyneeseen puuhun aiheuttaa pakkashalkeamat. Lisäksi pakkashalkeamien syyksi on esitetty puun märkyyttä./35/

#### 4.4 Happi

Ilman sisältämä happi tekee lahottaja- ja sinistäjäsiementen sekä bakteerien elämisen puussa mahdolliseksi. Ne vaativat elääkseen happea, mutta pystyvät kuitenkin elämään erittäin vähällä hapella, paljon vähemmällä kuin ilmassa on. Jopa yhden prosentin happipitoisuudella ilmassa on sienten kasvua havaittu./27/

Käytännössä on mahdotonta suojata puurakenne hapelta, jotta lahoamista ei tapahtuisi. Varastoitavien tukkien ruiskutus vedellä auttaa pitämään puun kosteuspitoisuuden

niin korkeana, ettei sienille ole kasvamiseen tarvittavaa määrää happea. Puurakenteet, jotka ovat vedessä tai maan sisässä pohjavedenpinnan alapuolella, eivät myöskään lahoa hapen puutteen vuoksi. On olemassa kuitenkin anaerobisia bakteereita, jotka kykenevät elämään ilman ilmasta saatavaa happea. Ne saavat tarvitsemansa hapen muuttamalla läsnäolevia rikkiyhdisteitä rikivedyksi. Rikkivedyn haju on tyypillinen tällaisille olosuhteille. Nämä anaerobiset bakteerit eivät aiheuta vaurioita puumateriaaliin, vaan yleensä muuttavat puun tummanruskeaksi./32/

Makeissa vesissä voi esiintyä anaerobisia lahottajabakteereita, jotka tuhoavat puuainesta ja lisäävät puun permeabiliteettia. Se taas saattaa aiheuttaa nimenomaan rakennepuutavaralle kuivaus- ja käsittelyongelmia. Vientiin menevältä puutavaralta on siksi usein vaadittu, ettei se saa olla uitettua. Puun pinnan pehmeneminen parantaa kyllästyvyyttä, mutta tämä tapahtuu epätasaisesti, eikä siksi ole suositeltavaa. Tästä syystä tukkien uittoa on vähennetty.

#### 4.5 Lämpötila

Puu pehmenee lämpötilan kohotessa, mikä johtuu ligniinin ja hemiselluloosan pehmenemisestä. Kuivan puun pehmeneminen alkaa noin  $180^{\circ}\text{C}$ :ssa, mutta kosteuspitoisuuden kasvaessa pehmeneminen alkaa jo alhaisemmassa lämpötilassa. Kuiva puu on pehmeintä noin  $320\text{--}380^{\circ}\text{C}$ :ssa ja yli 10 % kostea puu noin  $160^{\circ}\text{C}$ :ssa./26/

Lämpötila vaikuttaa sekä puun tasapainokosteuteen että ilman suhteelliseen kosteuteen. Tasapainokosteus laskee kaikilla suhteellisilla kosteuksilla matalien lämpötilojen, noin  $10\text{--}50^{\circ}\text{C}$  noustessa. Lämpötilan nousu  $60\text{--}110^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloissa saa aikaan tasapainokosteuden laskun alle 85 %:n suhteellisilla kosteuksilla. Yli



85%:n suhteellisessa kosteudessa tasapainokosteus kohoaa lämpötilan noustessa.

Puun lämpölaajeneminen on säteen suunnassa noin kymmenkertainen syynsuuntaiseen lämpölaajenemiseen verrattuna. Tangentin suunnassa lämpölaajeneminen on hieman suurempaa kuin säteen suunnassa. Syynsuuntainen lämpölaajenemiskerroin on  $\alpha_L = 3,39 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , vaihdellen tiheyden mukaan. Tiheyden ollessa  $460 \text{ kg/m}^3$  on säteen suuntainen kerroin  $\alpha = 25,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  ja tangentin suuntainen  $\alpha_T = 34,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Tangentin suuntainen lämpölaajeneminen on siis noin 1,4-kertainen säteen suuntaiseen lämpölaajenemiseen verrattuna. /35/ Puun lujuus kasvaa kuivumisen seurauksena alle  $100^\circ\text{C}$ :ssa, mutta jatkuva yli  $100^\circ\text{C}$ :n lämpötila aiheuttaa lujuuden menetystä./27/ Yleisesti pidetään puun syttymislämpötilana noin  $275^\circ\text{C}$ , mutta kappaleen koko ja muoto vaikuttavat syttymisherkkyyteen. Terve puu ei tavallisesti syty alle  $200^\circ\text{C}$ :ssa./35/

Alle  $200^\circ\text{C}$ :n lämpötilojen vaikutus puun komponentteihin on hidasta, lähinnä ne hajoavat. Koivun ja männyn hemiselluloosa hajoaa  $117 - 127^\circ\text{C}$ :ssa. Kuusen ligniini hajoaa  $130 - 145^\circ\text{C}$ :ssa ja useiden puulajien selluloosa  $156 - 170^\circ\text{C}$ :ssa./27/ Kun pyökkiä pidettiin  $160^\circ\text{C}$ :ssa 28 vrk, oli sen selluloosasta hajonnut 80 % ja ligniinistä 97,7%. Hiilihydraatit hajaantuivat jo muutamassa päivässä./27/ Puun kuivaamoissa sahatavaraa pidetään korkeassa lämpötilassa. Kuivausaika on kuitenkin niin lyhyt, ettei komponenttien hajoamista ehdi tapahtua.

Kun puun eri osa-aineet häviävät, tapahtuu myös painon alenemista. Paino aleni 11 puulajilla tehdyssä kokeessa vuoden aikana  $93^\circ\text{C}$ :ssa keskimäärin 2,7 % ja 470 päivässä  $121^\circ\text{C}$ :ssa 26,8 %. Pinnan hiiltymistä havaittiin jo  $93^\circ\text{C}$ :ssa./27/ Kun puuta kuumennetaan yli  $200^\circ\text{C}$ :n, kasvaa eri osa-aineiden hajoamisnopeus, mutta hajoaminen on silti hidasta.

Käytännössä pehmenemisellä on merkitystä kasvujännitysten laukaisijana ja kuivumisen aiheuttamien jännitysten pienentäjänä. Tiiviimmän puun aikaansaamiseksi voidaan puuta lämmittää ja puristaa lämpimänä, sillä tällöin soluseinät ovat niin pehmeitä, ettei niihin synny murtumia. Samassa yhteydessä voidaan puuhun imeyttää stabiloivia aineita. Lämmittämistä käytetään vaneriviliujen irroittamisessa, sillä puun ollessa pehmeää viilut eivät vaurioidu yhtä helposti kuin kylminä.

#### 4.6 Auringon säteily

Auringon säteilyn seurauksena puun ligniini hajaantuu, sillä se absorboi säteilyä voimakkaammin kuin selluloosa ja hajoaa huomattavasti nopeammin./31/ Tällöin selluloosakuidut irtaantuvat puun pinnasta harmaana nukkana. Ilmiötä kutsutaan foto-oksideatioksi ja sen syntymiseen tarvitaan valon lisäksi kosteutta ja ilmassa olevaa hapetta.

Aurinko syö puuta nopeammin kuin sade, talon eteläseinä kuluu aina nopeammin kuin muut sivut. Tutkimuksessa /1/ mitattiin eri ilmansuuntiin oleville julkisivuille tulevat säteilyannokset. Siinä todettiin, että pohjoisen julkisivun vuoden säteilyannos oli vain 1/3 etelänpuoleisen sivun säteilyannoksesta. Länsisivu sai säteilyä 3/4 eteläsivun säteilymäärästä ja itä sivu vajaat kaksi kolmasosaa. Teoksen /52/ mukaan kesäaikana pätee se, että pohjoissivun säteilyannos on noin 1/3 eteläsivun säteilystä. Koko vuoden säteilystä puhuttaessa on tämän mukaan pohjoissivulle tuleva osuus vain 13 % eteläsivun saamasta säteilystä. Ympäristön varjostava vaikutus saa aikaan eroja paikkakuntien välillä, mikä selittää toisistaan poikkeavat tulokset.

Ultraviolettisäteily ja näkyvä valonsäteily vaikuttavat kumpikin vanhenemiseen. Valon aiheuttama kulutus on



hidasta, erään arvion mukaan vain 5 - 12 mm vuosisadassa./15/ (Vrt. luku 3.4) Se kohdistuu vain aivan puun pintaan, noin 1 mm:n syvyiseen kerrokseen. Suurempi vaikutus auringonvalolla on pinnan kosteusliikkeisiin, sillä pinnan lämmityksessä ja kuivuessa syntyy halkeamia, joista kosteus ja lahottajat pääsevät puuhun.

Puisen julkisivupinnan hajoamiseen saattaa olla vaikutusta myös kuumuudella. Lämmön hajottava vaikutus puuhun ei kestä pitkään yhtäjaksoisesti, mutta astetunnit eli lämpötilan ja ajan tulojen summa saattaa vaikuttaa pinnan kulumiseen. Edellä mainittuihin lukuihin vertaamalla havaitaan, että lämmön vaikutus on kuitenkin tässäkin tapauksessa erittäin hidasta.

## 5 VAURIOIDEN KANNALTA KRIITTISET OLOSUHDETEKIJÖIDEN YHDISTELMÄT

### 5.1 Yleistä

Erilaisten vaurioiden syntyminen ei yleensä tapahdu hetkessä, vaan vaatii aikaa. Täsmällistä tietoa ajan vaikutuksesta vaurioihin yhdessä muiden olosuhteiden, kuten lämpötilan ja kosteuden kanssa on vaikea saada, koska erilaisia olosuhdeyhdistelmiä on runsaasti. Useissa vauriotapauksissa voidaan esittää vain oletuksia siitä, mistä tekijöistä vaurio pääasiassa johtuu.

Kriittisiin tekijöihin ollaan kuitenkin syventymässä tarkemmin. VTT:n puulaboratoriossa on käynnissä tutkimus, jossa lahottajasienten kriittisiä biologisia olosuhteita pyritään selvittämään yksityiskohtaisemmin kuin aiemmin. VTT:n rakennetekniikan laboratoriossa kehitetään lujuusopillisia menetelmiä puun kuivumisjännitysten laskemiseksi. Samoin pyritään mallintamaan halkeilua. Myöskin VTT:n rakennetekniikan laboratoriossa on meneillään tutkimus, jossa mitataan kosteuksia vanhojen puutalojen rakenteista.

### 5.2 Lahoamisolosuhteet

Lahottajasienien itiöitä on aina runsaasti ilmassa, sillä ne ovat niin keveitä, että ne lentävät tuulen mukana kaikkialle. Jotta lahoaminen alkaa, on itiöiden oltava riittävän pitkään kosteissa ja tarvittavan lämpimissä olosuhteissa. Eri tekijöiden vaikutus sienten kasvuun on yksittäisinä tekijöinä melko hyvin tiedossa, mutta ajan, lämpötilan ja kosteuden yhteisvaikutusta onkin vähemmän tutkittu.

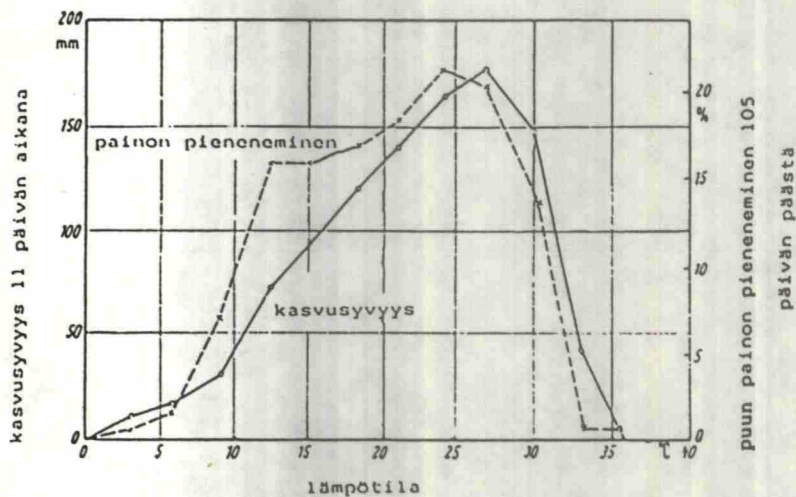
Sienirihmasto kasvaa parhaiten noin + 25 - 30°C:n



lämpötilassa. Jotta itiöt kuolisivat, tulisi puun lämpötilan nousta yli  $100^{\circ}\text{C}$ :n, sienirihmasto sen sijaan kuolee jo  $+50 - 70^{\circ}\text{C}$ :ssa. Ks. taulukko 5.1. Kasvua voi tapahtua vielä  $0^{\circ}\text{C}$ :ssakin, mutta se on erittäin vähäistä. Lämpötilan vaikutusta erään lahottajasienen kasvuun kuvaa kuva 5.1. Kuvasta havaitaan, että voimakainta kasvu on tällä sienilajilla noin  $+27^{\circ}\text{C}$ :ssa ja kasvu pysähtyy noin  $+36^{\circ}\text{C}$ :ssa. Painon pieneneminen on suurinta noin  $+25^{\circ}\text{C}$ :ssa, jolloin se on 21 % alkuperäispainosta.

Taulukko 5.1 Lahottajasienten kasvuedellytykset./28/

	Puun kosteus %	Lämpötila $^{\circ}\text{C}$
Rihmasto		
-kasvu alkaa	20	$+0 - +5$
-kasvu voimakainta	30 - 60	$+25$
-kasvu pysähtyy	80 - 120	$+35 - +50$
-lepotila	$<20, >100$	$<0$
-kuolee	-	$+50 - +70$
Itiöt		
-kuolevat	-	$>+100$



Kuva 5.1 Lämpötilan vaikutus Polyporus vaporarius-sienen kasvuun./29/

Itiöiden tappamiseen tarvittava lämpötila riippuu ajasta. Taulukossa 5.2 on kuvattu lämpätilan ja ajan yhteisvaikutusta, jotta sieni saadaan tuhottua. Mitä korkeampi on käsittelylämpötila, sitä nopeammin lahottajasienen itiöt kuolevat./27/

Taulukko 5.2 Suositusajat sienten tappamiseksi tuoreesta puusta./27/

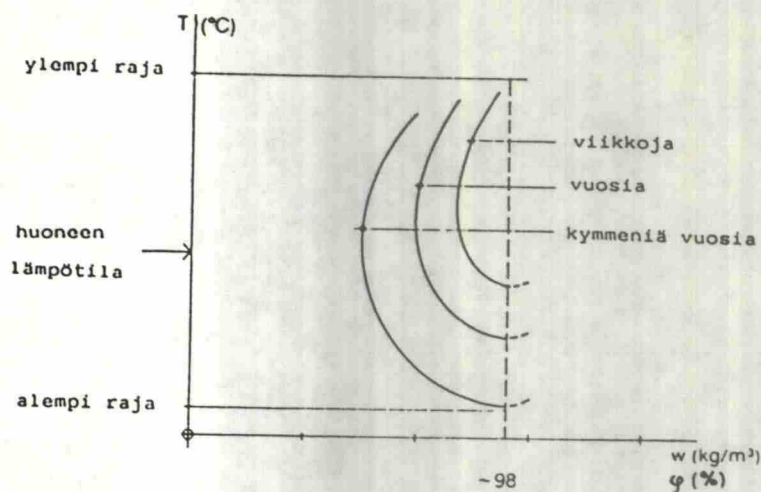
Lämpötila (°C)	Aika (min.)
66	75
77	30
82	20
93	10
100	5

Happi on välttämätöntä sienten kasvulle, mutta jo pienikin määrä riittää. Jopa ilman happipitoisuuden pudottua normaalista 21 %:sta 1 %:iin on sienten kasvua havaittu./27/ Ilman hiilidioksidimäärä vaikuttaa lahoamiseen, sillä suuri hiilidioksidipitoisuus hidastaa sienten kasvua./29/

Lahottaja- samoin kuin sinistäjäscientenkin hapentarve riippuu puun sisältämän kosteuden määrästä. Jos soluonteloissa on ilmaa, voi sieni kasvaa hyvin pienilläkin kosteuspitoisuuksilla. Jos happea sen sijaan on riittämättömästi, kasvu rajoittuu sellaisiin paikkoihin, joissa on suuri kosteus./29/

Lahottajasieni kasvaa parhaiten puun kosteuden ollessa 35 - 50 %. Alle puunsyiden kyllästymispisteen kosteudessa, joka vaihtelee eri puulajeilla ollen noin 20 - 35 %, kasvu on vähäistä, sillä vapaata vettä ei ole soluissa, vaan kaikki on sitoutunut soluseiniin. Kasvua on kuitenkin havaittu jo 15 %:ssakin. Suositeltavaa on, että rakenteessa puun kosteus jäisi 2 - 3 % soluseinien kyllästymispisteen alapuolelle./29/





Kuva 5.2 Periaatteellinen yhteys kosteuspitoisuuden, lämpötilan ja niiden vaikutusajan välillä./48/

Lahoamisen alkaminen vaatii erilaisen kosteuden kuin jo alkuun päässeeseen lahoaman kasvaminen. Itiöt yleensä vaativat tietyn kosteuspitoisuuden itääkseen, mutta se on suurempi kuin rihmaston kasvun vaatima kosteuspitoisuus./29/ Siitä, miten paljon suurempi on alkamis- kuin kasvukosteus, ei löydy kirjallisuudesta tietoja. Monet sienilajit voivat elää lepotilassa useita vuosiakin alunperin kosteassa mutta kuivuneessa puussa. Kun kosteuspitoisuus jälleen nousee, sieni jatkaa kasvamistaan.

Lahottajasienien solut muodostuvat erilaisista hiiliyhdisteistä, yli puolet sienien kuivapainosta on hiiltä. Sienten tärkeimmät ravintoaineet ovatkin hiiltä sisältävät yhdisteet./29/

Perusravinteet lahottaja- ja sinistäjä sienet saavat puusta olevista hiilihydraateista ja ligniinistä. Lahottajasienet pystyvät käyttämään ravinnokseen useita eri polysakkarideja. Ligniini ei yksin ole riittävä ravintoaine, vaikka tietyt sienten tuottamat entsyymit kykenevätkin käyttämään sitä hyödykseen. Tämä reaktio ei kuitenkaan tapahdu puun hiilihydraattien aineenvaihdunnan

kanssa samanaikaisesti./29/

On havaittu, että typen läsnäolo on puun lahottajien toiminnalle välttämätöntä. Vaatimus ei ole suuri, sillä puu sisältää vain 0,01 - 0,03 % typpeä. Typen lisäys kuitenkin kiihdyttää sienten toimintaa. Sienet eivät pysty käyttämään typpeä, mikäli läsnä ei ole B-vitamiinia eli thiamiinia. Tämä on ainoa elintärkeä <sup>1</sup>vitamiini monille sienille, mutta muutamien muiden vitamiinien lisäyksellä voidaan kasvua vielä kiihdyttää./29/

Peruskasvutekijöiden lisäksi tarvitaan muutamia orgaanisia mikroravinteita. Näitä ovat rauta, sinkki, kupari, mangaani ja molybdeeni. Hiukan enemmän tarvitaan fosforia, kaliumia, rikkiä ja magneesiumia./29/

Eräs sienten kasvun edellytys on sopiva happamuus. Lahottajasienet kasvavat parhaiten hiukan happamassa, pH:n ollessa 4,5 - 5,5. Normaali puu on happamuutensa puolesta hyvä kasvualusta, sillä terve puu on hiukan hapanta, sen pH on 4 - 6 riippuen puulajista./27/ Sekä valko- että ruskolaho kasvavat parhaiten tällä happamuusalueella. Molemmat lahottajatyypit lisäävät puun happamuutta aineenvaihduntansa seurauksena. Ruskolaho lisää happamuutta enemmän kuin valkolaho./29/

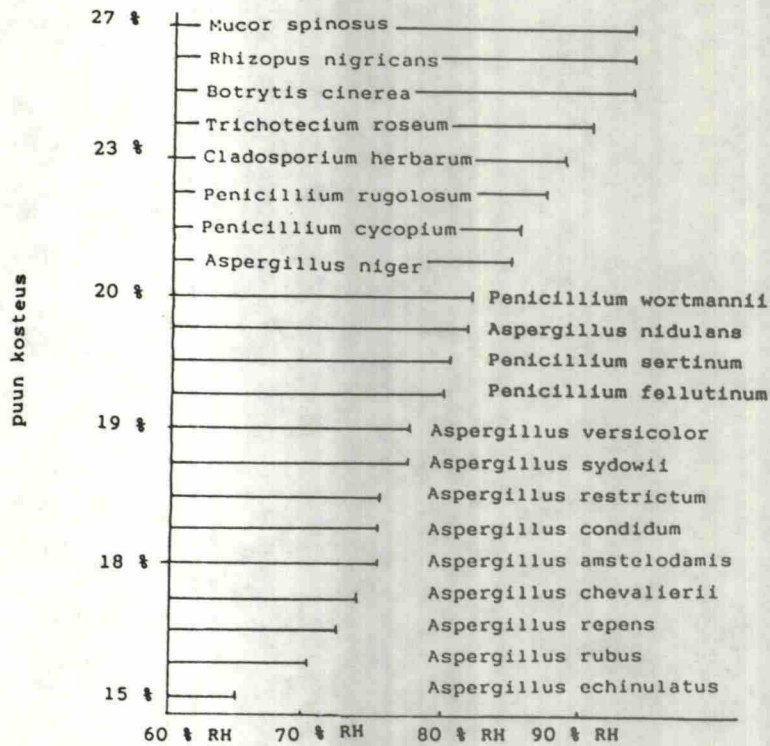
### 5.3 Homehtumis- ja sinistymisolosuhteet

Homesienten kasvuedellytykset ovat pääosiltaan samat kuin lahottajasientenkin: riittävä kosteus, sopiva lämpötila ja ravinteet. Lisäksi homesieni tarvitsee happea ja sopivan happaman kasvuympäristön.

Useille sinistäjä- ja homesienille on vapaan veden olemassaolo puussa rihmaston kasvun edellytys. Kosteuspitoisuuden tulee siis olla yli puunsyiden kyllästymispisteen. Rihmastot voivat kasvaa huomattavas-



ti alhaisemmissakin suhteellisissa kosteuksissa, kuten kuvasta 5.3 nähdään./25/



Kuva 5.3 Joidenkin homesienilajien rihmaston kasvun vaatima alin kosteuspitoisuus./25/

Home- ja sinistäjäsiementen kasvuun riittää ajoittainen ja lyhytaikainenkin kostuminen./31/ *Aspergillus*-suvun sienillä kasvu tapahtuu jo puun kosteuden ollessa 15 - 19 %. Useimmat homesienet kasvavat kuitenkin parhaiten puun kosteuden ollessa yli 20 % , ja voivat elää jopa vapaassa vedessä. Kasvaakseen edelleen ne kuitenkin tarvitsevat ilmassa olevaa happea ja ilman kosteutta. Jos kosteus pienenee alle lajin vaatiman alarajan, voivat useimmat homesienet pysäyttää kasvun siltä erää ja herätä henkiin taas, kun riittävää kosteutta ilmaantuu. On myös lajeja, joiden itiöt voivat elää kauan kuivassa ilmassa, mutta menettävät kosteassa kasvukykynsä./25/

Homesientien kasvun vaatima lämpötila on vähemmän tunnettu kuin kosteusvaatimukset. Useimmilla sienillä pidetään kasvun vaatimana minimilämpötilana  $+2 - 4^{\circ}\text{C}$  optimin ollessa  $+20 - 28^{\circ}\text{C}$  ja maksimin  $+32 - 37^{\circ}\text{C}$ . Poikkeus on "Cladosporium herbarum" -sieni, joka voi kasvaa vielä  $-6^{\circ}\text{C}$ :ssa. Homesientien rihmastoja voidaan jäädyttää ja säilyttää pitkiäkin aikoja  $-25^{\circ}\text{C}$ :ssa. Erikoisolosuhteissa, kuten puun kuivaamoissa esiintyy lämmönkestäviä lajeja, jotka kestävät jopa  $+50^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloja./25/

Sinistäjä sienet eivät kasva yli  $+35^{\circ}\text{C}$ :ssa. Poikkeuksena on eräs tammeen keltaista värjäätymää aiheuttava sieni, joka voi kasvaa hyvin vielä  $+40^{\circ}\text{C}$ :ssa ja jatkaa kasvuaan jopa  $+45^{\circ}\text{C}$ :ssa. Ilmeisesti sinistäjä sienet voivat kestää korkeitakin lämpötiloja lyhyen aikaa kerrallaan, mutta jatkuva kohonnut lämpötila tappaa ne. Toisaalta monet lajit ovat hyvin kylmiä lämpötiloja sietäviä ja pysyvät hengissä jopa jäätymisessä./27/

Homesientien kasvulle merkittävä tekijä on pH-arvo. Useimmat sienilajit kehittyvät parhaiten neutraaleissa tai hieman happamissa olosuhteissa, ja voivat muuttaa vaatimuksiaan happamaan suuntaan. Muutamat lajit sietävät myös erittäin emäksisiä olosuhteita./25/

Homesienet tuottavat kasvaessaan useita erilaisia orgaanisia yhdisteitä. Niiden energianlähteenä ovat pääasiassa sokerilajit ja typpi yhdisteet. Sinistäjä sienet vaativat ravinteensa yksinkertaisessa muodossa. Niiden tulee olla liukenevia hiilihydraatteja tai valkuaisaineita./29/

Sinistäjä- ja homesienet eivät elä puun perusaineilla, eivätkä näinollen vaikuta puun lujuusominaisuuksiin. Homeet voidaan tavallisesti poistaa puun pinnalta harjaamalla tai höyläämällä, ja näin on syytä tehdäkin, jotta nähdään, onko ohessa lahottaja- tai sinistäjä sieniä.



Sinistymää ei voida höyläämälläkään poistaa, sillä se ulottuu yleensä syvälle puuhun./28/ Sinistymä pystyy tunkeutumaan maalikerrosten ja jopa ohuiden metallikalvojen läpi.

#### 5.4 Halkeiluolosuhteet

##### 5.4.1 Vaihteleva kosteus

Kosteuden vaihteluille alttiita rakenteita ovat julkisivut täydentävine rakenteineen sekä rakennusten kosteat tilat, jotka eivät ole jatkuvassa käytössä.

Puisen julkisivun ja ikkunarakenteiden kosteuteen vaikuttavat ennen kaikkea ulkoilman suhteellinen kosteus, saateet ja pintakäsittely. Kun puu pyrkii ympäristön kosteuden kanssa tasapainokosteuteen, muodostuu puurakenteiden pinnan ja sisäosien välille jännityksiä kosteuden ja lämpötilan vaihdellessa. Lämpötilan noustessa puun pinta kuivuu ja halkeilee. Kuivumisen tapahtuessa nopeasti auringon lämmittäessä esim. tummaa ikkunanpuitetta, syntyy halkeamiakin nopeammin. Halkeamat sulkeutuvat kosteuden jälleen noustessa. Vaihtelu puupinnalla on suurinta kevätpäivinä, jolloin lämpötilaero yön ja päivän välillä saattaa olla useita kymmeniä asteita. On todettu, että auringonpaisteen lämmittäessä puuta sen kosteus laskee nopeasti ja on yleensä ulkoilman suhteellista kosteutta vastaavaa tasapainokosteutta pienempi./1/

Pinnoitekokeissa /72/ tutkittiin erilaisten pinnoitteiden vaikutusta liimapuupalkkien halkeamien muodostumiseen. Palkkien 10 mm leveiden reunakaistojen kosteuseroja kuivan ja kostean säilytyksen jälkeen verrattiin toisiinsa. Halkeamanmuodostuksen suhteen kriittiseksi kosteuseroksi pintakaistassa saatiin 10 - 12 %. On kuitenkin huomattava, että tämä pätee vain tämän kokeen ilmasto-olosuhteissa pidetyille koekappaleille. Kostean

säilytyksen ilman kosteus oli koko ajan 93 - 99 % RH ja lämpötila +15 - 25 °C. Kuiva säilytys oli ensimmäiset 15 päivää kosteampaa, 55 % RH ja +15 - 25 °C, mutta loppuajan olosuhteet olivat 0 - 25 % RH ja +30 - 37 °C. Lähes kaikissa tapauksissa halkeamat esiintyivät viimeistään 20 päivää kuivatuksen alkamisesta, joten tätä aikaa voidaan näissä olosuhteissa pitää halkeamanmuodostuksen suhteen kriittisenä arvona.

Suurissa teollisuuslaitoksissa on havaittu liimapuupalkkien halkeilua suurien avattavien ovien läheisyydessä. Tällöin kylmä ulkoilma vaikuttaa oven ollessa auki ja lämminilmapuhaltimen puhaltaessa puurakenteet joutuvat lämpimän ja kylmän ilman vuorovaikutukseen. Puurakenne siis kostuu ja kuivuu ja muodostuu helposti pintahalkeamia./33/

Puulattioihin syntyy yleensä huoneilman kuivuudesta johtuen rakoja, jotka menevät umpeen tai ainakin pienenevät ilman kostuessa. Lattiamateriaaliin kosteuden vaihtelutilanne syntyy myös silloin, jos lattiaverhous on asennettu kostean betonin päälle. Puulattia irtoaa alustastaan ja hajoaa tai nousee kupolille. Syntyvän laajenemisen aiheuttama jännitys saattaa vaurioittaa myös ympäröiviä seiniä.

#### 5.4.2 Liian pieni kosteus

Liian vähän kosteutta on huonetilassa varsinkin talvella. Kuiva huoneilma aiheuttaa ongelmia sekä lattiamateriaaleille että käyttäjille. Puu lattiassa kuivuu ja muodostuu haitallisia rakoja ja sälöjä.

Puurakenteen kuivuutta voi esiintyä valaisinten lämmittäessä kattokannattajia, jotka muutenkin ovat ylhäällä rakennuksen lämpimimmässä osassa. Liimapuun valmistuskosteus on yleensä 8 - 15 % puun kuivapainosta



ja vierekkäisten lamellien kosteuspitoisuuksien ero saa olla korkeintaan 5 %-yksikköä. Ennen rakenteen kokoamista saattaa vesipitoisuus vielä kohota. Asennuskosteudesta saattaa puu kuivua yli 10 %-yksikköä, jolloin jo 0,5 m:n korkuisen palkin kutistuma voi olla noin 10 mm./2/

Liimapuurakenteissa on usein liian nopean kuivumisen aiheuttamia pintahalkeamia. Ne johtuvat siitä, että pinta kuivuu sydänosaa nopeammin. Tähän tulisi kiinnittää huomiota ja suojata palkit aluksi kosteutta huonosti läpäisevillä pahveilla tai levyillä. Usein käytetty tapa on lämmityksen lisääminen hitaasti, 1 - 2°C viikossa, jolloin rakenteet ehtivät mukaan kosteusvaihteluihin. Kun valaisimet kiinnitetään suoraan liimapuupalkin alalamelliin, ne kuivattavat palkin alareunaa ja syntyy helposti halkeamia./33/

#### 5.4.3 Jännitystilan ja kosteuden yhteisvaikutus

Puussa vallitsevat puristus- ja vetojännitykset vaikuttavat puun tasapainokosteuteen. Vedossa tasapainokosteus kasvaa, koska vesimolekyyliä sitova pinta-ala lisääntyy. Vastaavasti puristuksessa tasapainokosteus on tavallista alhaisempi. Suurin tasapainokosteuden muutos tapahtuu jännityksen vaikuttaessa suurimman kosteusmuodonmuutoksen suuntaan eli puun tangentiaalisuuntaan. Nämä tasapainokosteuden muutokset ovat pieniä, alle yhden prosenttiyksikön suuruisia, joten kovin suurta merkitystä niillä ei ole. Puristusta vastaava tilanne syntyy, kun puuta estetään turpoamasta sen kastuessa./57/

Puun kutistumista ja paisumista pidetään usein lineaarisena. Kuten kuvasta 2.2 nähdään, ovat pituus- ja tangentin suuntaiset kosteusmuodonmuutokset lähes lineaarisia. Säteen suunnassa ei lineaarisuutta ole, eikä myöskään tilavuuden muutoksessa. Kutistuminen voi alkaa kosteuden vähentyessä jo paljon ennen puunsyiden

kyllästymispisteen saavuttamista. Veden kyllästäjän puun kuivuessa saattaa syntyä hyvin suuria jännityksiä, jotka johtuvat veden ja puun välisestä adheesiosta./14/

Toisinaan puun kosteuden lisääntymisestä aiheutuva turpoaminen tulee rajoitetuksi esim. jossakin rakenteessa mekaanisin keinoin. Tällöin paisumista rajoittavaa kappalletta vasten kehittyy paine, paisumispaine, jonka suuruus saattaa olla useita  $\text{N/mm}^2$  kohtisuoraan syitä vastaan. Jos puu kostuu useita kertoja ja joka kerta sen paisuminen estetään, syntyvä paisumispaine alenee kutistumiskertojen lisääntyessä. Tämä vaikuttaa siihen, että esim. puuastiat ja huonekalut ravistuvat ajan mittaan. Puuhun kehittyvä maksimipaine on suurempi kosteassa ilmassa kuin vedessä./14/

Kokeissa /72/ tutkittiin liimapuupalkkien jännityksiä halkeamien muodostumishetkellä. Puussa esiintyvän jännityksen laskemiseksi koekappaleiden poikkileikkauksen puoleksavälissä käytettiin teoksessa /81/ annettua menetelmää. Kuivatuksessa normaali-ilmassa ( $+20^\circ\text{C}$  / 65% RH) ilmeni maksimaalinen poikittaisjännitys, noin  $1,75 \text{ N/mm}^2$ , käsittelemättömän koekappaleen reunalla 13 päivää kuivatuksen aloittamisesta. Tämä johti halkeamaan  $150 \times 450 \text{ mm}^2$ -kokoisen palkin poikkileikkauksen puolivälissä. Kosteussuoja-aineilla käsiteltyjen palkkien jännitykset nousivat vastaavasti 45 päivän kuluttua noin  $2,0 \text{ N/mm}^2$ :iin, mutta tämä ei johtanut halkeilemiseen. Yhden koekappaleen reunajännitys oli jo 16 päivän jälkeen noin 10 % suurempi kuin muilla kappaleilla. Tähän palkkiin ilmestyi useampia halkeamia, mutta ne olivat melko lyhyitä.

Kappaleen kosteuspitoisuudella on usein vaikutusta murtokuvioon sekä puristuksessa, vedossa että taivutuksessa. Jos puristuskappale on erittäin kostea, saattaa puristus-pinta tyssääntyä kasaan lyhyeltä alueelta. Kun puuta taivutetaan, murtuu alhaisessa kosteuspitoisuudessa ole-



va puu muodostaen teräviä säröjä murtopintaan. Puun murtumissitkeys on suurimmillaan samoissa kosteuspitoisuuksissa kuin lujuudetkin, mutta tästä löytyy ristiriitais-takin tietoa./59/

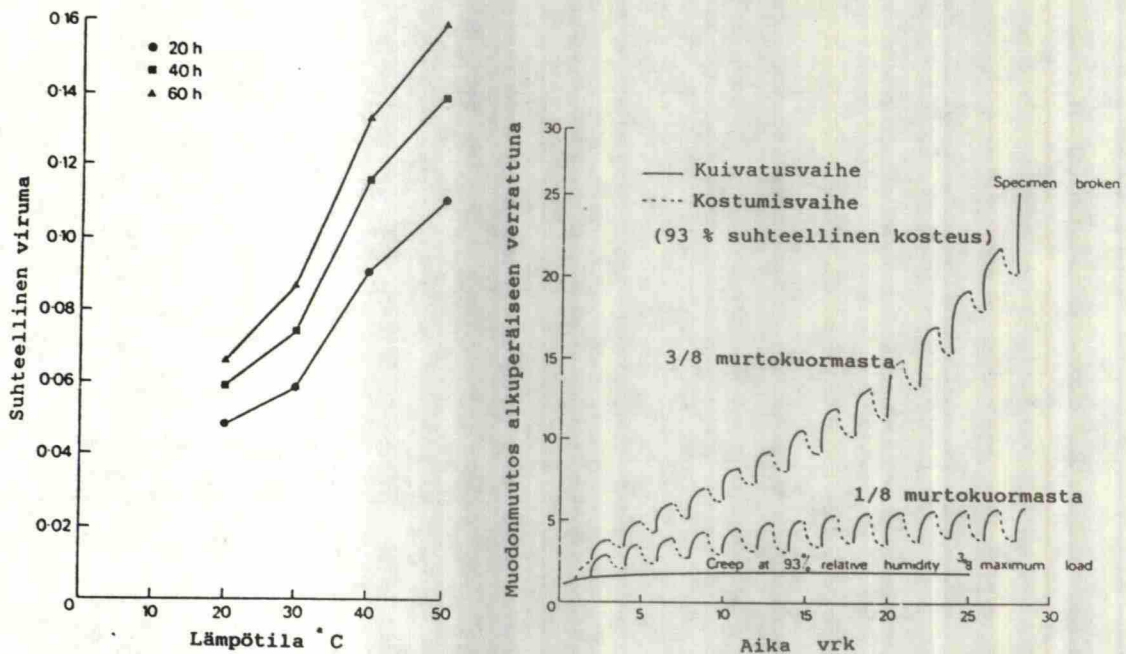
Lämpötila ja kosteuspitoisuus ja niiden muutokset vaikuttavat kuormitetun puurakenteen muodonmuutokseen eli virumaan. Viruma on suurempi syynsuuntaan nähden kohtisuorassa suunnassa kuin syynsuunnassa.

Syynsuuntaisessa jännityksessä lämpötilan ja kosteuden ollessa vakiot on puun todettu käyttäytyvän lineaarisen viskoelastisen materiaalin tavoin jännityksen ollessa alle 75 % vetolujuudesta. Syynsuuntaisessa puristuksessa epälineaarisuus alkaa 70 %:n kohdalla puristuslujuudesta. Taivutuksessa epälineaarisuus alkaa jo 56 - 60 %:n kohdalla.

Viruma jaetaan palautuvaan ja palautumattomaan osaan. Niiden suhteelliset osuudet kokonaisvirumasta riippuvat kuormitustasosta, lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta. Lämpötilan ja kosteuspitoisuuden nousu kasvattavat kokonaisviruman palautumatonta osaa. Kuvassa 5.4 on esitetty vasemmalla lämpötilan ja oikealla vaihtelevan kosteuspitoisuuden vaikutus suhteelliseen virumaan.

Kostean puun virumisnopeus ja viruma ovat huomattavasti suurempia kuin kuivassa puussa. Kun kosteuspitoisuus nousee 6%:sta 12%:iin, kasvaa viruma kaikilla kuormitustasoilla 20%.

Kosteuspitoisuuden vaihdellessa viruman suuruus vaihtelee, mutta se ei palaudu kokonaan, vaan osa jää pysyväksi. Mitä suurempi on kosteuspitoisuuksien ero kullakin syklillä, sitä suurempi on viruma.



Kuva 5.4 Vasemmalla lämpötilan ja oikealla vaihtelevan kosteuden vaikutus suhteelliseen virumaan./70/

Kosteuden muutokset vaikuttavat puukappaleiden liitoksiin ja muuttavat niiden geometriaa. Kun puukappaleet kuivuvat, niiden väliin syntyy rako, minkä seurauksena liitoksen toiminta muuttuu epäedullisemmaksi. Liitoksen lujuus pienenee ja siirtymät kasvavat. Varsinkin kosteuden vaihtelu on erittäin haitallista liitoksille./61/

### 5.5 Eri puulajien vaurioalttius

Puun sisältämät uuteaineet ja niiden määrä sekä puulajin tiheys vaikuttavat siihen, mikä sieni puuhun tulee vai tuleeko mikään. Suomen puulajeista lahonarimpia ovat mänty pintapuosaltaan, kuusi ja useimmat lehtipuut. Männyn sydänpuu sen sijaan sisältää sienille haitallisia uuteaineita, ja se kestää lahoamatta, eräiden kokeiden mukaan kaksinkertaisen ajan pintapuuhun verrattuna koe-kappaleiden oltua maakosketuksessa./28/ Sinistäjäsenet tulevat helpommin mäntyyn kuin kuuseen ja mäntysahatavara voikin kesällä sopivissa olosuhteissa sinistyä muutamassa



vuorokaudessa./23/

Tärkeimpiä puussa olevia uuteaineita ovat terpeenit ja puun pihka, jotka molemmat muodostuvat polyfenoleista, mm. erilaisista sokereista. Suurin osa uuteaineista sijaitsee sydänpuussa, ja useimmilla puulajeilla ilmenevä sydänpuun tummuus johtuu juuri niistä. Koska uuteaineet ovat suhteellisen myrkyllisiä, on sydänpuuosuus melko hyvin suojattu biologisilta tuhoajilta. Havupuiden tärkein polyfenoli on pinosylviini, joka on erittäin myrkyllistä ja suojaa näin hyvin sydänpuuta. Seetripuun hyvä lahonkestävyys taas johtuu tropoloneista, jotka myös ovat erittäin myrkyllisiä./29/ Muita puissa esiintyviä uuteaineita ovat fenolit, tanniinit, lignaatit ja sterolit. On tehty kokeita, joissa puulajin sydänpuusta on poistettu uuteaineet ja todettu sen lahoavan nopeammin kuin uuteaineita sisältävän sydänpuun koekappaleen./29/

Kuusen todettiin kestävän VTT:n kokeissa /7/ huomattavasti paremmin sään rasituksia kuin männystä tehtyjen koekappaleiden. Kuusikoekappaleet halkeilivat ja sinistyivät vähemmän kuin männystä tehdyt. Samanlaisia tuloksia on myös Sell /12/ saanut tutkimuksissaan. Hän on myös todennut männyn olevan aina kosteampaa kuin kuusen, jos säilytysolosuhteet ja pintakäsittely ovat samat.

Joidenkin puulajien pintapuun huonompi lahonkesto verrattuna sydänpuuhun saattaa johtua sen suuremmasta permeabiliteetista. Pintapuussa on myös enemmän hiilihydraatteja, jotka sattavat edistää sienien pääsyä puuhun./29/

## 6 PUURAKENTEIDEN KOSTEUS- JA VAURIOTUTKIMUKSIA

### 6.1 Alapohjien vauriot

Alapohjan puurakenteiden kosteuspitoisuuksia on selvitetty VTT:n tutkimuksessa /74/. Tutkimus oli esiselvitys siitä, onko maanvaraisen lattian ja puurunkoisen ulkoseinän liittymäkohdan puutavarassa vaarallisen suuria kosteuspitoisuuksia. Tutkittuja rakennuksia oli vain 15, mutta näinkin pieni otos antaa käsityksen kosteuspitoisuuksista ja mahdollisten kohonneiden kosteuksien syistä.

Kosteusmittaukset tehtiin sähköisellä vastusmittarilla. Mitatut kosteuspitoisuudet jäivät kuivissa tiloissa alle 20 %:n kaikissa muissa, paitsi yhdessä kohteessa. Siinä kohonneen kosteuspitoisuuden syynä oli ilmeisesti julkisivulevyn rikkoutuminen, jolloin sade- ja sulamisvedet pääsivät tunkeutumaan seinärakenteeseen. Pesutilojen alussoiroissa oli lähes 30 %:n kosteuspitoisuuksia, kuitenkin vain kahdessa kohteessa. Näissä syynä lieenee huonon rakennerarkaisun vuoksi pesutiloista tunkeutuva vesi tai mahdollinen putkivuoto. Vaikka korkeita kosteuspitoisuuksia oli lukumäärällisesti vähän, vastasivat ne otoksen pienuuden vuoksi kolmasosaa koko aineistosta.

Alussoiron kosteuspitoisuuteen vaikuttavat useat eri tekijät, varsinkin kosteiden tilojen kohdalla. Sisäpuolinen kosteus ja seinärakenteeseen tunkeutuvat pesuvedet ovat pesutilojen ongelma. Kuivien tilojen kohdalla osoittautui pohjaveden korkeus ainoaksi tilastollisesti merkittäväksi tekijäksi. Näissä kosteus nousee maaperästä täyttöhiekan ja sokkelin kautta. Ilmansuunnan vaikutus kosteuspitoisuuksiin näytti jossain määrin merkitsevältä, ja todettiin, että idän ja pohjoisen puoli olivat kosteampia kuin lännen ja etelän puoli. Auringon kuivattava vaikutus näkyy selvästi.



Pesutilojen kohdalla ovat sisäpuoliset kosteusrasitukset ratkaisevia, joten ilmansuunnalla ei ole merkitystä. Alussoiron korkeudella maanpintaan nähden ei ollut vaikutusta kosteuspitoisuuteen. Vaikka monissa kohteissa soiro sijaitsi maanpinnan tason alapuolella, ei se ollut muita kosteampi. Jotta vedet valuisivat rakennuksesta pois päin, olisi tärkeää, että ympäröivän maanpinnan kaltevuus on riittävä. Täyttömaan tulee olla routimatonta ja sen rakeisuuden tulee olla RIL 126:n "Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus" mukainen. Pohjaveden korkeus-  
asemalla ei käytännössä ollut merkitystä.

## 6.2 Yläpohjien ja kantavien rakenteiden vauriot

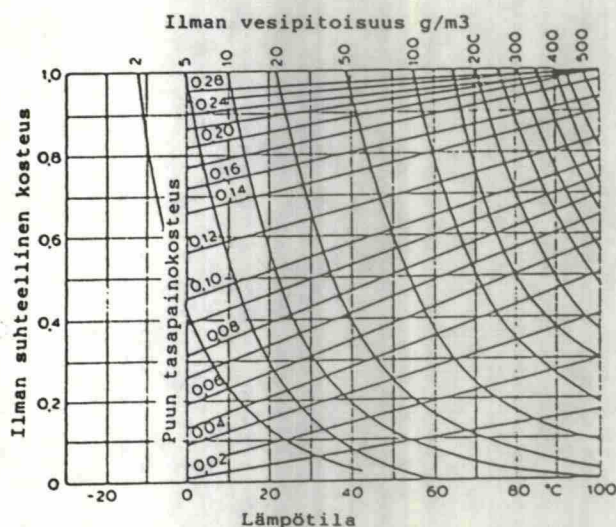
Yläpohjarakenteita ja kantavia liimapuukurakenteita tutkittiin kahdella kenttäkäynnillä. Ensimmäisellä kerralla tutkittiin rakenteita silmämääräisesti ja otettiin valokuvia. Toisella käynnillä mitattiin samoista kohteista sekä puun että ilman kosteuksia ja halkeamien syvyyksiä. Puun kosteuksia mitattiin sähköisellä vastusmittarilla, jonka merkki on Gann HT75.

### Tapiolan urheiluhalli

Tapiolan urheiluhallissa on liimapuinen runko, pääkannattajina kolminivelkaaret  $1095 \times 163 \text{ mm}^2$ . Ilman kosteus hallin ylätasanteella oli 4.6.87 noin 36 %RH. Pääkannattajien kosteus ylätasanteella oli 6 - 8 % ja pilareiden 5 - 7 %. Pelikenttä oli noin 5 m alempana. Nämä arvot pitävät hyvin paikkansa ilman vesipitoisuus - puun tasapainokosteus -käyrästön kanssa, joka on esitetty kuvassa 6.1. Ilma hallissa on hyvin kuivaa sekä puurakenteiden kannalta että pelaajia ajatellen.

Liimapuiset rakenteet ovat usein ainakin pinnaltaan halkeilleita. Halkeamia on liimapuulamelleissa jo valmistusvaiheessa, mutta ne sijaitsevat usein

näkymättömissä rakenteen sisässä. Valmistus- ja käyttökosteuden ero vaikuttaa kuivumishalkeamien syntymiseen, mutta vaikuttavana tekijänä on myös rakenteen kosteushistoria.



Kuva 6.1 Ilman vesipitoisuus ( $\text{g/m}^3$ ) ja puun tasapainokosteus. /40/

Tapiolan urheiluhallin lähes kaikki liimapuurakenteet ovat halkeilleita, tosin kaarien yläosiin näkee vain kiikarilla. Puurakenteiden kosteus, noin 7 %, on huomattavasti alle valmistuskosteuden, joka on 10 - 15 %. Halkeamat ovat ilmeisesti kuivumishalkeamia.

Pääkannattajien alapäiden halkeamat ovat ohjautuneet kiinnityspulttien kohdille.





Kuva 6.2 Halkeamia palloiluhallin pääkannattajan kiinnityskohdassa. Halkeaman maksimileveys oli 6 mm, syvyys maksimissaan 102 mm.

Pintahalkeamat pääkannattajissa olivat alle millimetrin levyisiä ja noin 10 mm syviä. Pilareissa oli halkeamia joka sivulla, keskellä sivua. Halkeamien syvyys oli 3 - 5 mm ja leveys 1 - 2 mm. Näin pienillä halkeamilla ei käytännössä ole kantavuuden kannalta merkitystä. Esteettistä haittaa pilarien halkeamista on, sillä niitä ei voi olla huomaamatta. Palkkien halkeamat lähtivät useimmiten sormijatkoksen kohdalta ja kulkiputkijohdalla tai lamellissa, selvää eroa ei kumpaankaan suuntaan näyttänyt olevan.

#### Matinkylän jäähalli

Palloiluhallista poikkeavia olosuhteita edustaa Matinkylän jäähalli, jonka kosteuspitoisuuksia mitattiin myös 4.6.87. Hallissa tehtiin korjauksia ja jäätä sulatettiin ensimmäisen käynnin aikana huhtikuun lopussa.

Sulatettaessa hallia ei tuuletettu, joten ilma hallissa oli hyvin kosteaa ja haihtuva kosteus kerääntyi rakenteisiin. Hallissa on teräsbetonipilarit ja terästangoilla jännitetyt liimapuiset pääkannattajat.

Pääkannattajien kosteutta voitiin mitata vain reunoilta, palkkien päistä, sillä yläosa on tavoittamattoman korkealla. Palkin kosteus oli 16 - 17 %. Ilman kosteus oli ylhäällä katsomon yläreunassa 58 %RH ja alhaalla 64 %RH. Katto- ja seinälankuista mitattiin 15,5 - 16 %:n kosteuksia. Puun tasapainokosteus 15 °C:n lämpötilassa ja 60 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa on käyrästön (kuva 6.1) mukaan 12 %. Suurempi mitattu kosteus johtuu siitä, että hallissa on ollut kosteampaa, eikä puun kosteus ole vielä tasaantunut alemmalle tasolle. Käyrästä voidaan päätellä ilman kosteuden olleen noin 80 %RH jään sulatuksen aikana. Matinkylän jäähallin puurakenteissa ei ollut halkeamia havaittavissa. Tämä on täysin ymmärrettävissä, sillä puun kosteus vastasi liimapuun valmistuskosteutta tai oli jopa yli sen.





Kuva 6.3 Valkoisia homelaikkuja ja valumavesien aiheuttamia värinmuutoksia Matinkylän jäähallin kattokannattajissa, Espoossa.

Matinkylän jäähallin liimapuiset pääkannattajat ovat olleet keväällä jään sulatuksen ajan ja sen jälkeen erittäin kosteissa olosuhteissa. Kosteutta on kerääntynyt puurakenteisiin ja ylhäällä katonrajassa lämpimässä ovat homelaikut ilmestyneet palkin pintaan, kuva 6.3. Home näkyy valkoisina laikkuina lähes jokaisessa palkissa. Palkeissa on myös valumavesien aiheuttamia värjäytymiä. Jäähallissa ei värinmuutoksista ole kuitenkaan esteettistä haittaa. Homeen olemassaolo viestittää siitä, että myös lahottajasienille otolliset olosuhteet ovat olemassa.

#### Uimahallit

Mittauksia suoritettiin myös kahdessa eri uimahallissa, Kauniaisten ja Vuosaaren uimahalleissa. Kauniaisten uimahalli on valmistunut 1973 ja Vuosaaren 1979. Kummassa-

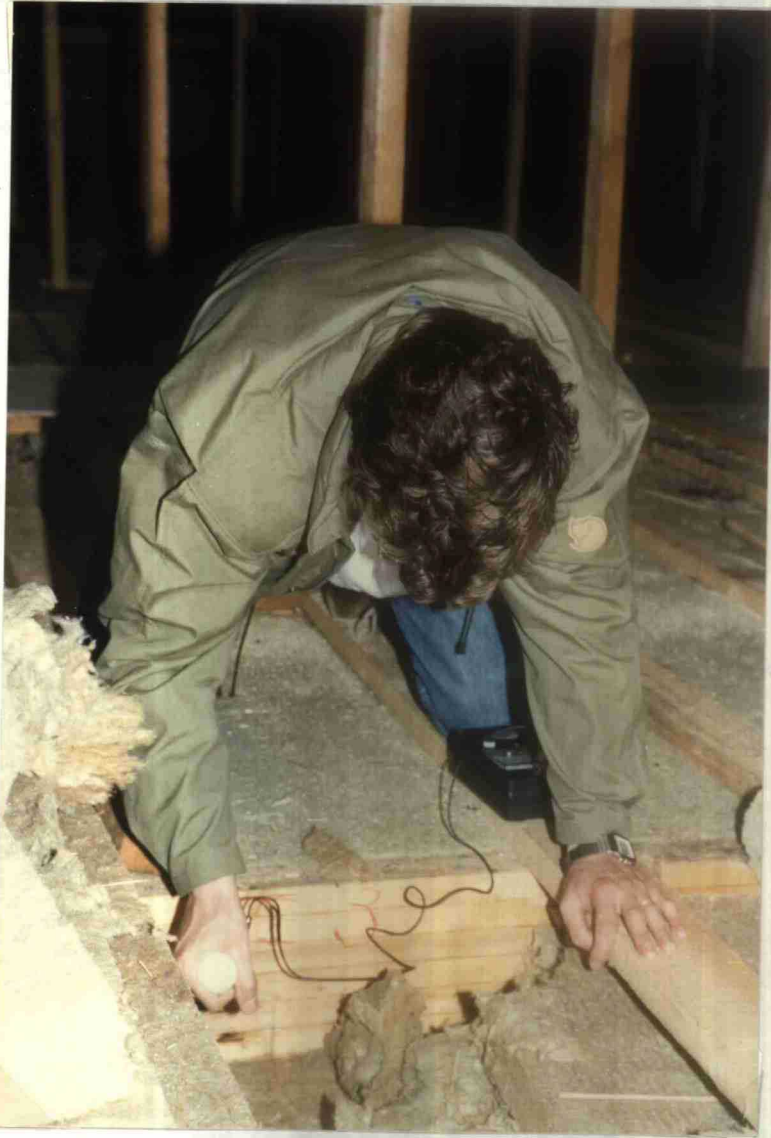
kin on liimapuiset pääkannattajat, Kauniaisissa myös pilarit. Taulukossa 6.1 on esitetty vertailukelpoisia mittaustuloksia. Puun kosteudessa on pieni ero. Vuosaaressa näyttäisi puun kosteus olevan suurempi, tosin mittaustarkkuus on noin  $\pm 1\%$ .

Taulukko 6.1 Kauniaisten ja Vuosaaren uimahallien kosteusmittauksia 4.6.87.

	Kauniainen	Vuosaari
Ilman kosteus	55 %RH	54 %RH
Kannattajan sivu, lamellin suunta	7 - 8,5 %	9 - 10 %
Kannattajan alapinta, lamellin suunta	7 - 8,5 %	8,5 %

Vuosaaren uimahallista mitattiin kosteuksia myös yläpohjasta. Kattokannattajien yläpinta pengottiin esiin 300 mm paksun yläpohjaeristeen alta ja sen kosteus oli 9,5 - 10 %, mikä on sama kuin hallissa mitattu kannattajan sivun kosteuspitoisuus ja lämmöneristeen alta esiin kaivetun liimapuisen sekundäärin kosteus. Ilman kosteus tilassa oli 64 %RH. Sisäilmassa 54 %RH:n kosteudessa ja 26°C:n lämpötilassa puun tasapainokosteus on kuvan 6.1 mukaan 10 %. Yläpohjan tuuletustilassa lämpötila oli kuitenkin lähes sama kuin ulkoilman lämpötila + 15°C, jolloin puun tasapainokosteus 64 %RH:ssa on 12 - 13 %. Saamamme pienempi arvo saattaa johtua mittausepäätarkkuuksista, mutta sateisen päivän kostea ilma saattoi myös vaikuttaa tuloksiin. Ilma tilassa lienee tavallisesti kuivempaa kuin mittauspäivänä. Tästä osoituksena ovat myös muista tilan puurakenteista mitatut kosteudet. Vesikaton kannatinrakenteiden kosteudet olivat 7,5 - 8,5 %, kattolaudoista mitattiin 6,5 - 7 %.





Kuva 6.2 Kosteuden mittaus Vuosaaren uimahallin yläpohjassa, mitattavana sekundäärিকannattaja.

Kauniaisten uimahallin liimapuiset pääkannattajat ovat molemmista päistään ulkona räystääiden kannattajina ( kuva 6.5 ). Aukean pihan puoleisesta palkin sivusta oli lakkaus kulunut monin paikoin kokonaan pois. Lakattomista kohdista satiin kosteuspitoisuudeksi 13 - 15,5 %. Ehjän lakkauksen puolelta mitattu kosteus oli suurempi, 15,5 - 17 % , mikä johtuu vähäisemmästä kosteuden haihtumisesta lakatulta pinnalta. Ilman kosteus ulkona oli 70 %RH ja lämpötila + 15°C, joten kyseiset kosteuspitoisuudet vastaavat puun tasapainokosteutta.



Kuva 6.5 Kauniaisten uimahallin pääkannattajan ulkona oleva pää.

Kauniaisten uimahallin liimapuukannattajissa oli vähän halkeamia. Halkeamien leveys oli noin 1 - 1,5 mm ja syvin, 0,1 mm:n rakotulkin levyllä mitattu oli 44 mm syvä. Kaikki halkeamat ovat pintahalkeamia, joita on vaikea havaita, joten niistä ei ole edes esteettistä haittaa.

Vertailukohteemme edelliseen, Vuosaaren uimahallin liimapuukurakenteet, sisälsivät enemmän halkeamia kun Kauniaisten hallissa. Yhden palkin halkeama oli selvästi



havaittavissa. Se ulottui lähes läpi koko palkin pituuden, mutta ei onneksi poikkisuunnassa. Tällöin palkin kantokyky olisi huomattavasti heikentynyt. Halkeama sijaitsi noin neljän lamellin päässä palkin alareunasta. Tämän havaitsimme muuallakin, halkeamat sijaitsivat yleensä noin neljä - viisi lamellia palkin alareunasta. Tämä saattaa johtua lamellien lujuusluokan muuttumisesta tällä kohdalla, sillä ulkolamellit korkeudelle  $h/6$  alareunasta ovat lujuusluokaltaan keskilamelleja parempaa puutavaraa.



Kuva 6.6 Liimapuisen palkin alareunan halkeama. Vuosaa-  
ren uimahalli, Helsinki.

Halkeaman syystä ei voida olla varmoja, mutta valmistusvirheestä ei liene kyse. Palkit olivat kastuneet asennusvaiheessa erittäin märiksi, joten kyseinen halkeama lienee muissa palkeissa sijaitsevia halkeamia rajumpi kuivumishalkeama. Palkkien halkeamia oli asennusaikaisen kastumisen seurauksena täytetty värittömällä epoksiliimalla ja palkit oli hiottu värivaurioista puhtaiksi. Halkeaman syvyyttä tai leveyttä ei päästy

mittaamaan, sillä palkki sijaitsee aivan altaan päällä.

Muissakin palkeissa oli selvästi havaittavia halkeamia, mutta ei niin suuria kuin kuvan 6.6 palkissa.

Vuosaaren uimahalliin on tehty perusteellinen vesikattoremontti, kun yläpohjassa havaittiin vaurioita. Kosteus yläpohjassa johtui sisäpuolisen ylipaineen kuljettamasta kosteudesta. Kosteus pääsi yläpohjaan höyrynsulun huonosti tehdyissä saumoissa tapahtuneiden ilmavuotojen mukana. Vesikatto on ilmeisesti ollut ehjä. Alkuperäisen höyrynsulun todettiin olevan tarkoitukseen soveltumatonta materiaalia. Kosteuden seurauksena vesikaton aluslaudoitukseen oli tullut sienikasvustoa, joka todettiin kosteassa ja lämpimässä viihtyväksi saunasieneksi. Aluslaudat olivat erittäin pahasti lahonneita. Paikoin ne olivat jopa kokonaan hävinneet pois lahottajasienen vaikutuksesta. Rihmastoja näkyi useissa kohdissa.

Vesikatto uusittiin ja katon tuuletustilaa korotettiin siten, että se on enimmillään 1,8 m. Tuuletustilaan aikaansaatiin ylipaine niin, että paine-ero hallitilan ja tuuletustilan välillä on mahdollisimman pieni. Rakenteiden tiiviyyttä parannettiin asentamalla kattoon uusi höyrynsulku. Se tiivistettiin kattopalkkien väliin alhaaltapäin. Nykyinen kattorakenne hallissa näyttää olevan kosteusteknisesti toimiva, sillä keväällä 1987 mitatut kosteuspitoisuudet vastaavat puun tasapainokosteutta, eikä kosteaa ilmaa kerry tuuletustilaan.

Ulkona olevissa ei kantavissa rakenteissa havaittiin halkeilua. Ikkunoiden ympärillä olevat liimapuiset "kehikot" olivat varsinkin etelän ja lännen puoleisilla sivuilla erittäin halkeilleita. Niiden pinnoite oli kulunut sään vaikutuksesta pois, kuva 6.7.





Kuva 6.7 Halkeama liimapuisessa ikkunan reunapuussa, suunta etelään.

Kemin uimahallissa sattui syksyllä 1983 paljon huomiota saanut kattovaurio./88/ Hallissa kuului päivällä voimakas pamahdus, ja pari tuntia myöhemmin havaittiin yhden kattokannattajan kohdalla tasainen noin 300 mm:n painuma. Se oli koko palkin pituuden, 25,5 m:n matkalla. Palkit ovat liimapuisia, 5,5 m:n välein olevia harjapalkkeja, koko 190 x 1270 - 1530. Palkkien alareunasta oli tuettu pienillä kulmateräksillä alakattoelementit, joiden koko oli  $2,5 \times 5,5 \text{ m}^2$  ja paino 530 kg/kpl.

Tarkastuksessa palkin todettiin leikkautuneen kahteen osaan. Alemman osan korkeus oli 380 mm ja lohkojen välinen railo oli 350 mm korkea. Puun murtotilan käyttäytymismallin mukaan harjapalkissa leikkauslujuus ylittyy ensimmäiseksi ja palkki leikkautuu pituussuunnassa kahdeksi kappaleeksi. Koko alakattoelementin paino kohdistui alimpiin lamelleihin, jotka ovat vedettyinä muutenkin palkin helpoimmin vaurioituva osa. Vaurion tapahtuttua palkin alaosa kannatti alakattoelementtien painon ja yläosa vesikaton painon.

Palkit oli valmistettu 18 vuotta sitten, eikä tuohon aikaan laadunvalvonta ollut yhtä tehokasta kuin nykyisin. Lisäksi liimat ovat kehittyneet tasaisemmiksi kuin aiemmin. Vaurio oli kuitenkin vain yhdessä palkissa, eikä muissa palkeissa ollut edes pintahalkeamia. Pinnan kuivumishalkeamien puuttumisesta voidaan päätellä valmistuskosteuden olleen saman kuin käyttötilan kosteuden.

#### Rivitalokohde

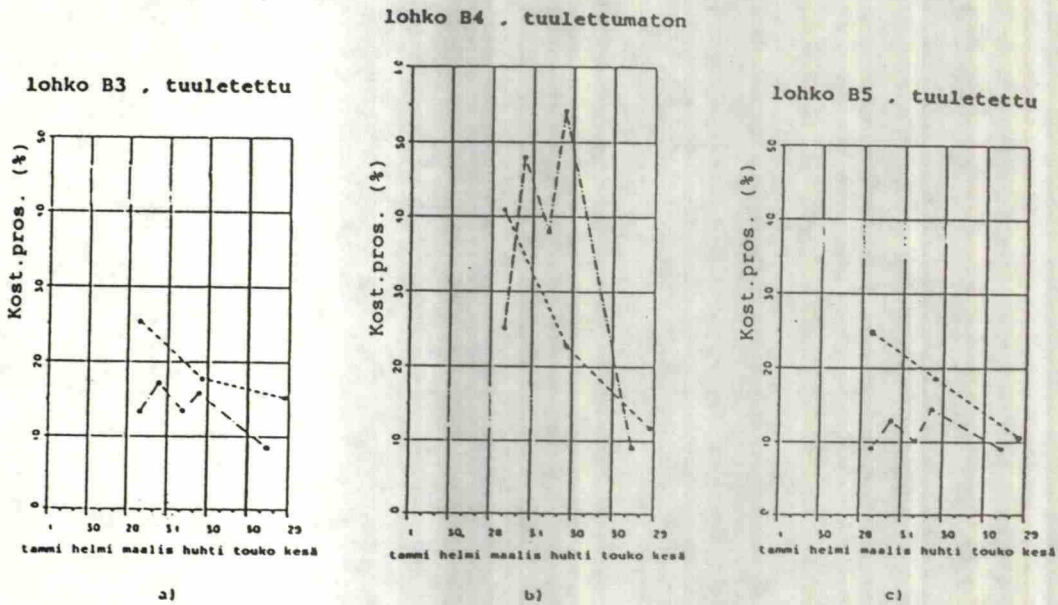
Yläpohjan puurakenteiden kosteuspitoisuuksia mitattiin teoksessa /4/ samalla kun muiltakin osin tutkittiin yläpohjan lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä ja tuuletuksen merkitystä. Tutkimuksen mittaukset suoritettiin keväällä 1985.

Tutkittavina olivat kolmen rivitalon yläpohjat, joissa oli yhteensä seitsemän asuntoa. Osa yläpohjista saatiin tuulettumattomiksi tukkimalla mineraalivillalla räystäiden 50 mm korkeat tuuletusraot ja peittämällä harjalla olevat  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  tuuletushormit tiiviisti muovisäkeillä. Talot ovat kaksikerroksisia, tiili- ja lautaverhoiltuja sekä aumakattoisia. Kantavat rakenteet ovat betonia, vesikatteen kannattajat ovat puiset. Kate on harvalaudoituksen päällä, harjalla ja räystäällä on umpilaudoitus.



Ilman suhteellista kosteutta mitattiin yläpohjien lisäksi ulkoilmasta ja huoneilmasta. Kosteuspitoisuuksia mitattiin puurakenteista ja lämmöneristeistä. Puun kosteutta mitattiin sekä sähköisellä vastusmittarilla että koekappalein. Koekappaleet olivat mäntylautaa  $22 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  ja ne sijoitettiin harjalla ruodelautojen väliin. Niiden kosteudet mitattiin punnitsemalla kappaleet alussa ja 2,4,6 ja 8 viikon päästä kokeen alkamisesta. Tulokset on esitetty kuvassa 6.8.

Puun kosteuspitoisuudet olivat selvästi suuremmat tuuletumattomissa yläpohjissa. Suurin kosteus, joka mitattiin maaliskuussa, oli yli 40 %. Maaliskuussa oli kaikissa yläpohjissa kosteinta ja kevään yli 20 %:n kosteuspitoisuudet alenivat kesäkuussa lähelle 10 %:a. Sähköisellä vastusmittarilla saadut arvot olivat yleensä punnittujen koekappaleiden arvoja suuremmat. Näytekappaleet lienevät olleet liian kuivia lohkoihin viettäessä, ja niiden kostuminen on tapahtunut hitaasti. Eräässä mittauslohkossa, kuvan 6.8 kohta b, imeytyi katteessa sulanut vesi koekappaleisiin, jolloin niiden kosteuspitoisuus kohosi 55 %:iin. Tätä arvoa ei siis voida huomioida kosteuspitoisuuksia vertailtaessa.



Kuva 6.8 Koekappaleilla ja puun kosteusmittarilla mitatut puun kosteuspuutosuudet yläpohjissa mittausjaksolla./4/

----- = puunkosteusmittarilla  
----- = näytekappale

### 6.3 Laho- ja homevauriot

Lahovaurioita on selvitetty vanhojen rakennusten korjaus ja kunnostustoimenpiteitä suunniteltaessa. Seiniä, välipohjia sekä muita tarpeellisiksi katsottuja rakenteita on revitty auki, jotta vauriot on löydetty, sillä lahovaurion laajuus selviää vasta rakenteita aukomalla.

### Albergan kartano

Espoossa sijaitsevassa Albergan kartanossa on tehty kuntoselvitys keväällä 1985./82/ Kartano on rakennettu 1800-luvun lopulla. Rakennuksessa on puurunko, pystytolpat 150 x 150 k 1000, joiden molemmin puolin on 25 mm:n laudoitus ja sen päällä ristikkäinen rimoitus eli tikutus. Tikutuksen päällä on rappaus. Mitään



lämmöneristeitä ei seinissä ole.

Alapohjan puurakenteet ovat pahasti lahonneita. Kellariin on rakennettu uusia tukirakennelmia, mutta kuten kuvasta 6.9 nähdään, on lahottajasieni levinnyt sekä uuteen puutavaraan että betonipintaiseen alapohjan alapintaan.

Kellaritilan puurakenteiden lahoaminen johtunee siitä, että tuuletusluukut on joskus talveksi suljettu ja unohdettu avata kevään tullen. Tuulettumattomassa, kosteassa tilassa on lahottajasieni, pääasiassa lattiasieni, kasvanut hyvissä olosuhteissa. Kellaritilassa on tunkkainen haju, mutta huonetiloihin ei homeenhajua tullut./82/



Kuva 6.9 Lahottajasienen rihmastoja kellaritilassa. Albergan kartano, Espoo./82/



Kuva 6.10 Lahottajasienen rihmastoa kellaritilassa. Albergan kartano, Espoo./82/

Seinien alajuoksut ovat pahasti lahonneita, kuva 6.11. Ne ovat olleet rapatun kuoren sisässä ja kostuneet sekä lahonneet. Seinissä rungon molemmin puolin oleva laudoitus ei sen sijaan ole lahonnut. Materiaaliselvityksessä puulajin todettiin olevan ulkomaista männynsukuista puulajia, joka suuren uuteainepitoisuutensa vuoksi on kestänyt lahoamatta.

Huomionarvoinen seikka rakennustavassa on se, että seinärakenteen tuuletusta on ajateltu erityisellä huolellisuudella. Hirsien sisäpinnoissa, nurkkien molemmin puolin ja myös välipohjan kohdalla oli alajuoksuihin lovettu v:n muotoiset pystysuorat urat, jotta ilma kiertäisi seinärakenteessa ilman katkoksia kerroksesta toiseen.





Kuva 6.11 Seinän lahonnut alajuoksu. Albergan kartano, Espoo./82/

#### **Sinebrychoffin huvila**

Helsingin ja Espoon rajalla Karhusaaressa sijaitseva Sinebrychoffin huvila on rakennettu 1800-luvun lopulla. Suurimmat rakenteelliset vauriot johtuvat siitä, ettei hirsiseinille ole jätetty tarpeeksi painumavaraa. Vinoon painuneiden seinien tukina toimivat mm. hormien reunat. Lahovaurioita on seinien alimmissa hirsissä, kuva 6.12. Hirret ovat paikoitellen täysin pehmenneitä.



Kuva 6.12 Alimpien hirsien pehmeyttä osoittaa tässä se, että ruuvimeisselin terä painui puuhun helposti. Karhusaaren huvila, Espoo./82/

Se, että seinät ovat alaosistaan lahonneita, on museoviraston kannan mukaan luonnollista./82/ Entisaikana rakennettaessa tiedettiin, että alimmat hirret lahoavat, ja ne vaihdettiin aina tarpeen vaatiessa. Kun hirsiä ei enää ole vaihdettu, ne ovat lahonneet.

Paikoitellen seinähirsien pinta näytti melko terveeltä, mutta alta paljastuikin täysin pehminnyt puu, kuva 6.13. Kuvan 6.14 seinässä on ulkopuolen "höyrynsulukuksi" laitettu bitumihuopa estänyt tuulettumisen ja rakenne alla on lahonnut.





Kuva 6.13 Terveen näköisen puupinnan alta paljastunut lahonnut sisäosa. Karhusaaren huvila, Espoo.  
/82/



Kuva 6.14 Lahonneita seinähirsiä. Karhusaari, Espoo./82/

## Villa Elfvik

Espoossa sijaitseva 1903 rakennettu hirsirakenteinen huvila, Villa Elfvik, on päästetty pahasti rappeutumaan. Vesikatto oli useita vuosia puutteellinen ja vedet valui-  
vat sisään tehden lahottajasienille hyvät kasvupaikat, kuvat 6.15 ja 6.16. Osa pahannäköisistä vaurioista johtui valumavesien aiheuttamista värjäytymistä, eikä ollutkaan niin vakavia kuin päällepäin näytti. Välipohjan raken-  
teet olivat myös täysin lahottajasienen ympäröimät, kuva 6.17.



Kuva 6.15 Vesivuodon lahottama seinä. Kosteus on tullut katolta valumavesistä. Villa Elfvik, Espoo./82/





Kuva 6.16 Vesikaton tukirakenteita ja valkolahoa seinässä. Villa Elfvik, Espoo./82/



Kuva 6.17 Lahottajasienen rihmastoja ja sienen lahottamaa puuta välipohjassa. Villa Elfvik, Espoo./82/

#### Kaartin kasarmi

Edellä esitettyihin verrattuna melkolailla erityyppinen lahovaurio on ollut Helsingissä sijaitsevassa Lapuan Kaartin kasarmi F:ssä, joka on valmistunut 1848. Raken-  
nuksen kantavat seinät ovat tiiltä, mutta tasot  
puurakenteiset. Tasoja kantavien palkkien päät olivat  
seinien viereltä, tukipisteiden läheltä paikoitellen  
täysin lahoja, kuva 6.18, ja olisivat varmasti jonkun  
ajan kuluttua murtuneet kokonaan. Syynä vaurioon lienee  
lattioiden säännöllinen pesu runsaalla vedellä, joka va-  
lui lattiaankkujen läpi muihin puurakenteisiin kastellen  
ne.





Kuva 6.18 Lahonneet lattiapalkkien päät, Lapuan kaartin kasarmi, Helsinki./82/

Taloa rakennettaessa oli lattiapalkkien päiden tuuletuksesta huolehdittu, ainakin ajatus tuulettumisesta oli askarruttanut suunnittelijan mieltä. Useilla kohdilla lattianrajassa, lankun kohdalla, oli pieni ritilä, josta seinän sisässä oleva lankun pää saattoi tuulettua.

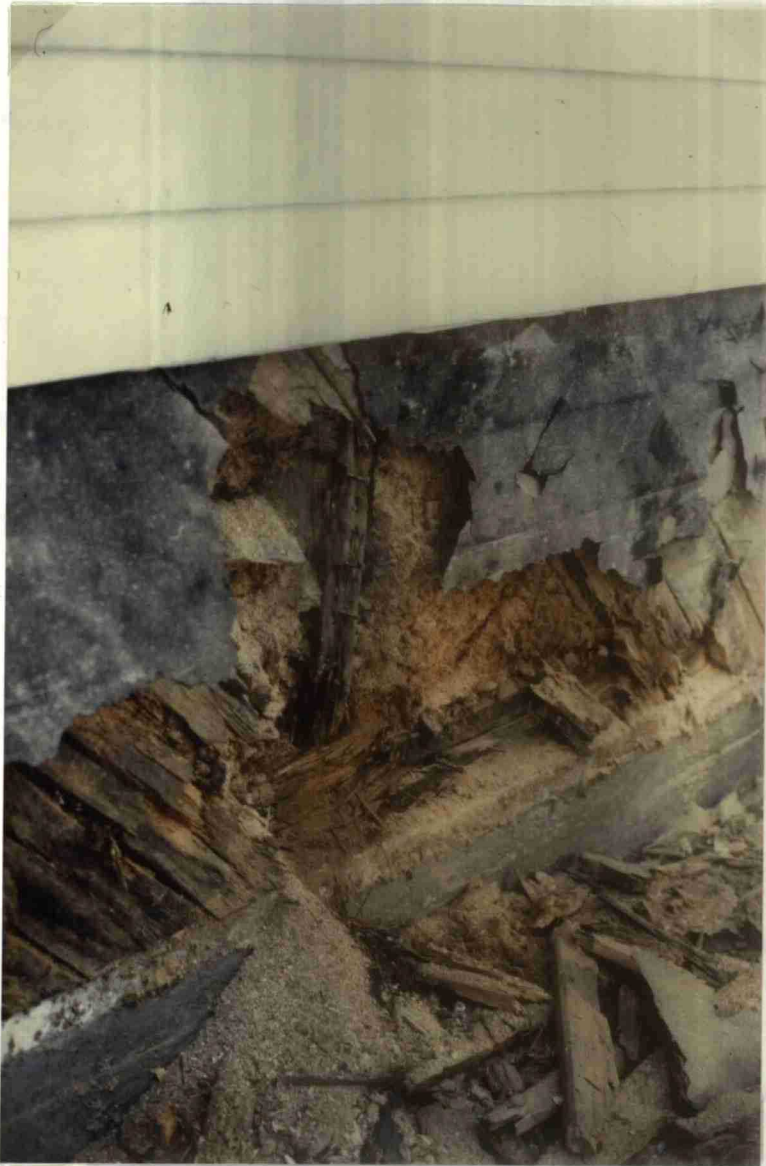
Rakennevirheistä johtuvia seinien puurakenteiden lahoamisia on tapahtunut runsaasti. Kun hirsiseinä vuorattiin molemmin puolin rappauksella, kuva 6.19, ei puurakenteisiin kertynyt kosteus päässyt poistumaan mistään ja seinä lahosi kuorien sisässä.



Kuva 6.19 Molemmmin puolin rapattu hirsiseinä on lahonnut alareunasta./82/

Saman tyyppinen tiivis rakenne oli eräässä Espoolaisessa 1950-luvulla rakennetussa omakotitalossa. Seinien ulko-verhouksen sisäpuolella oli bitumihuopa, joka oli estänyt kosteuden haihtumisen. Vettä oli ilmeisesti valunut katoilta seinärakenteen sisään. Paikoin olivat pystyrunkotolpat täysin lahonneita ja talo pysyi pystyssä osittain seinän vinolaudoituksen turvin. Kuva 6.20.





Kuva 6.20 Bitumihuovan alla lahonnut seinärakenne./82/

### **Revonlahden kirkko**

Historiallisesti arvokkaan Revonlahden kirkon rakenteita on tutkittu ja sittemmin kunnostettu./83/ Kirkko on rakennettu 1775 ja sitä on korjattu 1925. Perusteellinen korjaus on valmistunut 1959.

Kirkon lattiassa todettiin lahovaurioita 1984, minkä jälkeen VTT:ltä tilattiin tutkimus ja korjausehdotus vaurioista. Korjausta tehtäessä vauriot kuitenkin osoittautuivat oletettua laajemmiksi, varsinkin ulkoseinissä

ja vesikaton rakenteissa.

Peruskorjauksessa oli alapohja lämmöneristetty 100mm mineraalivillalla, jonka alla oli tervapaperi ja päällä alumiinipaperi. Tämä muutti lattian tiiviiksi, eivätkä tuuletusaukot sokkelissa enää riittäneet huolehtimaan tuuletuksesta. Sokkelin läheltä löytyi kolmesta kohdasta lattiasienivaurioita. Museoviraston edustajan mielipide /83/ on, että alkuperäisen lattian hävittäminen lähes kokonaan, ylintä kannatuspalkkia lukuunottamatta, oli turhaa. Vauriot olisi voitu korjata paikallisesti ja tehostaa tuuletusta, olihan kirkko säilynyt lahoamatta jo pari vuosisataa.

VTT:n tutkimuksessa todettiin vähäisiä lahovaurioita vesikaton rakenteissa ja niiden oletettiin aiheutuneen vanhan vesikaton vuodoista. Vauriot osoittautuivat pahimmin kärsineiden sisänurkkien kohdalla vakaviksi. Joidenkin kattotuolien päät olivat lahonneita ja koko katon kannatus oli uhattuna. Sidehirsien tukikonsolit olivat myös osittain irronneet kirkon sisäpuolella. Sekä vesikaton rakenteiden että ulkoseinän ja yläpohjan vaurioiden syy oli kirkon osa-aikainen lämmittäminen yhdessä yläpohjan eristämisen kanssa, eli kosteusrasituksen lisääminen samalla kun kosteudenläpäisyä vähennettiin. Näin tapahtui myös alapohjassa.

-----

Erään urheiluhallin liimapuukaaren ulkona olevat osat oli päällystetty pellillä erittäin tiiviisti. /84/ Vesikatolta valuvat vedet pääsivät valumaan pellityksen sisään, mutta kosteus ei tuulettunut pois. Vaurio havaittiin katon uusimistöiden yhteydessä, ja tällöin palkki oli useista kohdista täysin pehmennyt, sitä pystyi kovertamaan ruuvimeisselillä. Tällaiset piilossa olevat puuosat ovat hyvin lahonarkoja, varsinkin tiiviissä tilassa. Haittana on myös se, ettei vaurioita helposti havaita, kun rakenne



on piilossa.

Aina ei pahalta näyttävä värinmuutos ole merkki vauriosta. Porin jäähallissa havaittiin liimapuisten kattokannattajien tummuneen kosteuden ja lämpötilan vaihteluiden seurauksena. Palkit olivat mustat ja niiden luultiin lahonneen. Tilannetta pidettiin huolestuttavana, kunnes palkkien pintaa rikottiin. Puu oli värjäytyneen pintakerroksen alla kovaa ja tervettä./84/ Korjaustoimenpiteeksi riitti tummuneen pinnan höylääminen.

Hometta on rakennuksissa yleensä tummina pilkkuina. Tammelassa sijaitsevan höylähirsisen kesämökin ulkoseinissä on kauttaaltaan homepilkkuja. Mitä enemmän seinän osa on tuulelle, sateille ja auringolle alttiina, sitä enemmän näyttää olevan homepilkkuja. Pohjoisseinä ja verannan sisäseinä ovat lähes pilkuttomat. Sisällä pilkkuja ei ole. Mökki on rakennettu 1983 ja suojattu samana kesänä värittömällä puunsuojalla. Homeesta on lähinnä esteettistä haittaa. Homepilkkuja on muuta aluetta enemmän sellaisissa paikoissa, joissa puu on pihkaista, kuten oksankohtien ympärillä. Pehmeämpään kevätpuuhun on tullut homepilkkuja kesäpuuta enemmän. Homepilkut eivät irtoa rapsuttamalla terävällä esineellä, eivätkä edes teräsharjalla harjaamalla. Ainoa keino niiden poistamiseksi on puupintojen höyläys tai hionta.

Samanlaista mustaa pilkkuhometta on Otaniemessä sijaitsevan autokatoksen liimapuisissa kattokannattajissa. Rakennus on kaikilta seiniltä avoin, vain verkkoaidalla suojattu, joten palkit tuulettuvat hyvin. Kuvassa 6.21 näkyy homepilkkuja palkin alalaidassa. Homeen muodostumista on estetty sivelemällä päälle lakkaa tai puunsuoja-ainetta. Siitä ei ole tietoa, onko käsittely lopettanut tai hidastanut homepilkkujen leviämistä.



Kuva 6.21 Homepilkkuja autokatoksen kattopalkeissa.

#### 6.4 Värivauriot

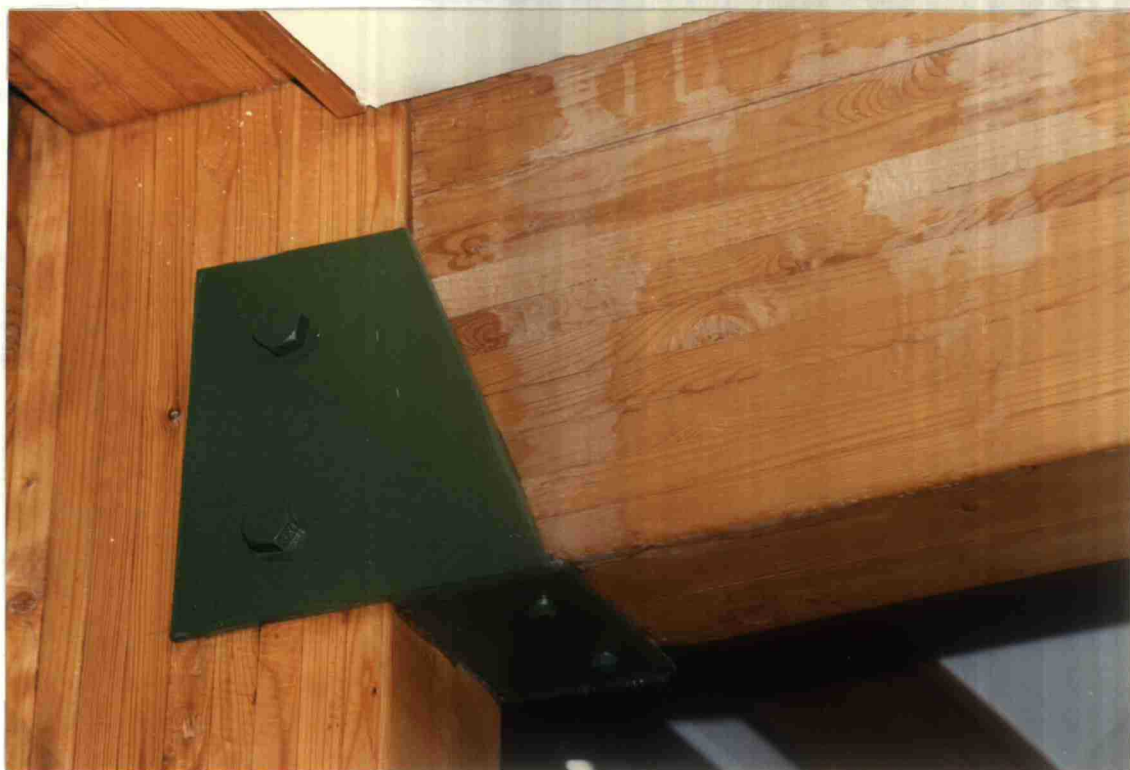
Värivaurioita havaittiin lähes jokaisessa tutkitussa kohteessa. Auringonvalon ja klooriveden haalistamat pilarin alapääät Kauniaisten uimahallissa on esitetty kuvassa 6.22. Värivaurioilla ei tässä eikä muissakaan tapauksissa ole merkitystä rakenteen kantavuuden kannalta. Niistä on vain esteettistä haittaa.





Kuva 6.22 Auringonvalon ja klooriveden aiheuttama värin haalistuminen. Kauniaisten uimahalli.

Vesikatolta vuotanut tai kondensoitunut vesi on Tapiolan palloiluhallin matalalla osalla värjännyt palkkeja, kuva 6.23. Lakkauksen väri on muuttunut, mikä saattaa osittain johtua siitä, että valkoista väriä on liuennut alakattolevystä. Koska valumakohta on kuivunut, ei lahoamisvaaraakaan ole, vaan ainoa haitta on se, että läiskät ovat ikävän näköisiä.



Kuva 6.23 Valumavesien aiheuttama värjäytymä Tapiolan palloiluhallin matalan osan kattokannattajassa.

Vuosaaren uimahallilla on syntynyt värinmuutos ikkunan pielirakenteen sijaitessa aivan aidan pylvään vieressä. Lumi kinostuu pylvään päälle ja ympärille. Kyseisestä kohdasta on lakkaus kulunut pois ja puu on tummunut, kuva 6.24.





Kuva 6.24 Värivaurio, joka johtuu lumen ja veden kuluttavasta vaikutuksesta ja metalliputken sijainnista.

Hyrylän liimapuisessa jalankulkusillassa on tummia värjäytymiä liitospulttien kohdilla, kuva 6.25. Useista paikoista on pulttien ympäristö tummunut. Puu on painekyllästettyä, joten lahottajia siihen ei tule, mutta liitoskohdat ovat ruman näköisiä. Pulttien sinkitys ja puun kyllästysaine saattavat olla yhteensopimattomia, koska värivaurioita on ilmestynyt jo näin nopeasti. Katso myös luku 6.6.



Kuva 6.25 Tummaksi värjäytyneet pulttien ympäristöt ja lankulkusillassa Hyrylässä.

## 6.5 Ikkunoiden vauriot

Tutkimuksia ikkunoiden kunnosta on tehty niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa, mutta varsinaisia kosteuden mittauksia on tehty vähän.

Ikkunanpuitteiden kosteuspitoisuuksia on mitattu VTT:n kenttäkartoituksessa /78/ vuosina 1960 - 1974 valmistuneista kerrostaloista. Mittaukset suoritettiin 1976. Huoneistoja oli kaikkiaan vain 24 kappaletta, mutta näinkin pienen otoksen perusteella saatiin vaurioiden laadusta hyvä käsitys. Alakarmissa ja puitteen alaosassa esiintyi lahoa ja pinnan rappeutumista. Kaikissa tutkituissa ikkunoissa oli ulkopuite selvästi huonommassa kunnossa kuin sisäpuite. Kosteuserot ikkunanpuitteiden eri osissa olivat suuret.

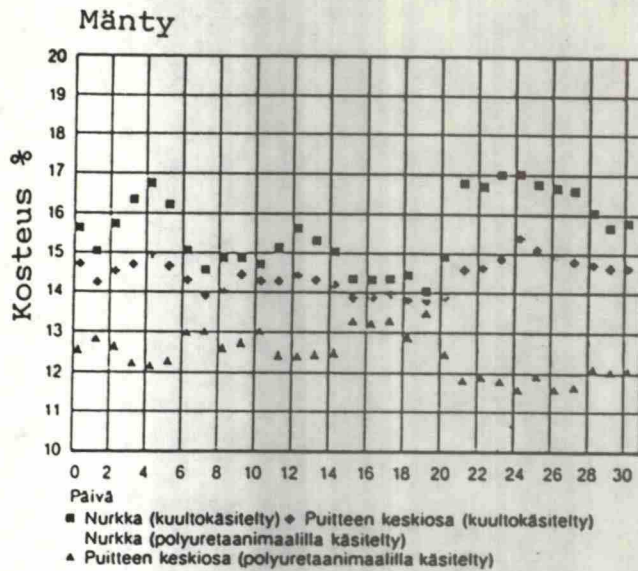


Taulukko 6.2 Kerrostaloikkunoista mitattuja kosteuspi-  
toisuuksia./78/

Osa	Keskim.kost.pit. (%)
Sisäpuite	
-alaosa	14
-yläosa	12
Ulkopuite	
-alaosa	28
-yläosa	17
Karmi	
-alaosa	26
-yläosa	15

Karmin ja ulkopuitteen alaosien kosteudet ovat tämän mu-  
kaan niin suuret, yli 20 %, että lahoaminen on  
mahdollista. Paikoitellen oli kosteutta jopa yli puun-  
syiden kyllästymispisteen kosteuden, mikä johtui lahon  
olemassaolosta.

VTT:llä on viime- ja tämän vuoden aikana tutkittu raken-  
nuksiin kohdistuvia säärasituksia /1/ ja siinä yhteydessä  
on mitattu ikkunoiden ulkopuitteiden kosteuksia. Kuva  
6.26. Suurimman osan vuotta kosteus pysyy alhaisena, kos-  
ka sateiden kesto aika on yleensä lyhyt. Aurinkoisten  
päivien aikaan puu ehtii kuivua. Vain marras-tammikuussa  
kosteutta kertyy enemmän, koska auringon kuivattava vai-  
kutis puuttuu ja jäätyminenkin hidastaa kuivumista./1/  
Sadevesi tunkeutuu puuhun nurkasta, josta se imeytyy  
syvemmälle puun syiden suunnassa.



Kuva 6.26 Kuultokäsiteltyjen ja polyuretaanimaalilla käsiteltyjen ikkunan ulkopuitteiden kosteudet VTT:n koetalossa tammikuussa 1986./1/

Suomessa ei tiettävästi ole julkaistu muita kosteudenmittaustutkimuksia, mutta Sveitsissä ja Englannissa on kosteuspitoisuuksia ikkunoistakin mitattu. Ruotsissa on laajalti selvitetty puuikkunoiden lahovaurioita, mutta varsinaisia kosteudenmittauksia ei löydy.

Sveitsissä ovat puurakenteisia ikkunoita tutkineet Sell ja Kuhne./79/ He korostavat viistosateen merkitystä, sillä se tunkeutuu puuhun auenneista nurkkaliitoksista. Vaalean ikkunan vuotuinen keskekosteus oli noin 14 %, vaihdellen 11 %:sta 17%:iin, kun tummalla ikkunalla arvot olivat vastaavasti noin 11 %, 8 % ja 14 %. Tutkitut ikkunat olivat keskimäärin 3 - 4 vuotta vanhoja.

Englannissa tehdyssä tutkimuksessa /80/ mitattiin 137:n ikkunan kosteuspitoisuuksia 1 - 14 vuotta vanhoista ikkunoista. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin muissakin tutkimuksissa: kosteus on suurin ikkunan alaosassa ja lähes puolessa ikkunoista oli jonkin kohdan kosteus yli 30 %. Karmin keskiosassa ylemmissä osissa oli koste-



utta 10 - 15 %. Lahoamisrajana pidetyn 20 %:n kosteuden ylitti 75 % mitatuista ikkunoista.

Puuikkunoiden lahovaurioita on Ruotsissa tutkittu paljon /85/, /86/ja/87/. Teoksen /85/ tutkimukseen valittiin nelisenkymmentä kohdetta, joille tehtiin tarkat vaurioselvitykset. Kohteet valittiin maantieteellisesti kattavasti ja mukaan otettiin pahimmin vaurioituneet ikkunat. Vertailtiin myös samanlaisissa olosuhteissa olleita vaurioitumattomia kohteita vaurioituneisiin.

Ikkunoiden vauriot on ryhmitelty sen mukaan, missä osassa ikkunaa vaurio on. Ikkunat on valmistettu 1955 - 1971, suurin osa 1960-luvulla. Valtaosassa, 75 - 80 %:ssa ikkunoista, lahovauriot sijaitsevat karmissa. Pohjoissivuilla on vähiten lahovaurioituneita ikkunoita, mutta muiden ilmansuuntien välillä ei ole tämän tutkimuksen mukaan eroja. Korkeissa kerrostaloissa kasvaa vaurioiden määrä ylöspäin mentäessä.

Teoksessa /85/ on listattu vaurioiden tärkeimpiä syitä. Ikkunan rakenne vaikuttaa siihen, miten helposti vesi imeytyy karmiin. Välipuiden ja alakarmin liitokset ja nurkkaliitokset ovat helpoimmin vaurioituvat paikat. Huono kittaus lasin alareunassa päästää veden ikkunan alapuitteeseen, samoin vesipellin kiinnityskohdista vesi pääsee usein suoraan karmin sisään. Mikäli karmin ja seinän liitoskohdan eriste imee vettä, se ei pääse tiiviin kittauksen vuoksi kuivumaan ulospäin, joten kosteus imeytyy eristeestä karmiin. Julkisivumateriaalin ollessa tiivistä, vettä imemätöntä materiaalia, valuvat vedet pitkin seinän pintaa ikkunaan. Elementtitehtaalla valmiiksi asennettuihin ikkunoihin tulee jo valmistusvaiheessa suuri määrä kosteutta suoraan betonista. Tällaisissa ikkunoissa onkin erittäin usein lahovaurioita.

## 6.6 Muut rakenteet

Hirsiseinien sadetiiviyttä ja kosteuspitoisuuksia mitattiin tutkimuksessa /62/. Tutkimus suoritettiin kenttätutkimuksena tammikuussa 1986. Tutkittavia kohteita oli 19, joista kesämökkejä oli 3, loput 16 olivat jatkuvalämmitteisiä. Rakennusten ikä oli keskimäärin 3,5 vuotta. Puun kosteudet mitattiin hirsien pinnasta sähköisellä vastusmittarilla. Mittauksia suoritettiin kussakin kohteessa ulkopuolelta 3 - 5 kappaletta ja sisäpuolelta 2 - 4 kappaletta.

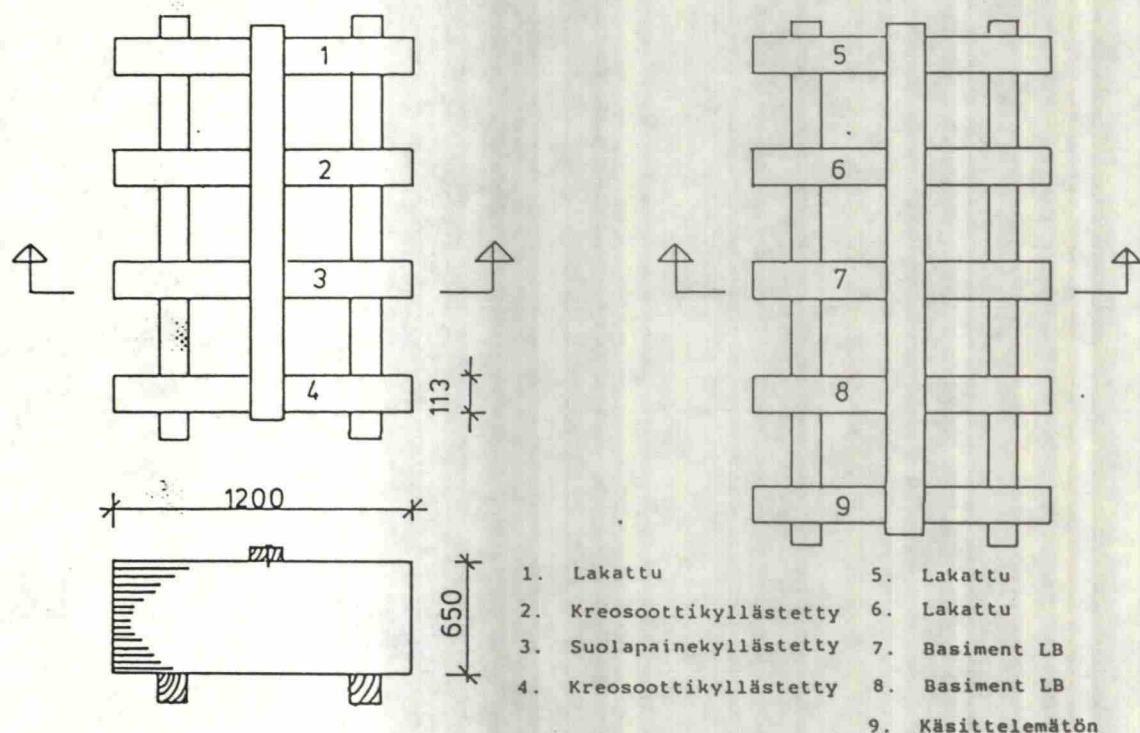
Jatkuvalämmitteisistä rakennuksista mitattiin sisäpuolelta 6 - 11 %:n kosteuksia, poikkeuksena Kirkkonummella sijainneista kohteista 10 - 14 %. Lisäksi kahdessa kohteessa oli vesivuotokohtia, joiden kosteus oli yli 30 %. Kesämökeissä sisäpinnan kosteus oli 12 - 16 %. Ulkopuolelta mitatut kosteudet olivat 18 - 24 %, tosin poikkeusarvojakin mitattiin sellaisista kohteista, joissa oli ollut sadekuuroja juuri ennen mittauksia.

Taulukko 6.3 Mitattuja hirsiseinien kosteuspitoisuuksia.  
/62/

Kohde	Paikkakunta	kpl	pintapuu ulkona(%)	pintapuu sisällä(%)
Jatkuvalämm.				
Näyttelyrak.	Järvenpää	3	17 - 29	8 - 10
Edustushuvila	Kirkkonummi	2	19 - 23	9,5 - 12
Saunarakennus	-"-	1	19 - 22	12 - 14
Ok-talo	Karstula	3	17 - 23	6 - 12
Kylmät				
Lomaosake	Viljakkala	6	18 - 23	6 - 8
Kesämökki	Mänttä	2	22 - 29	13 - 16

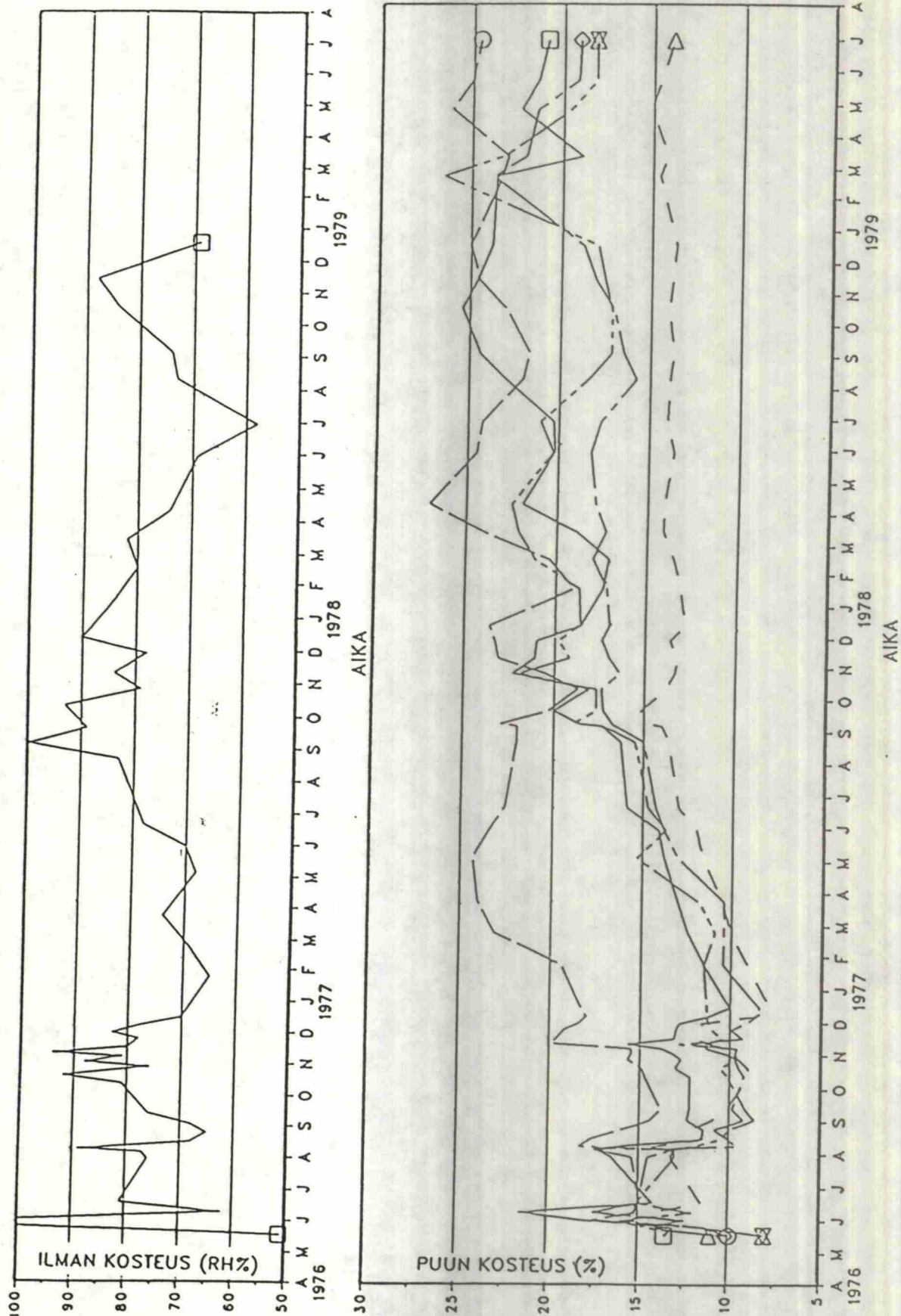


Vierumäen Teollisuus Oy:ssä on mitattu koekentälle asetettujen liimapuisten palkkien, koko  $113 \times 650 \text{ mm}^2$ , kosteuspitoisuuksia. Mittauksia suoritettiin 18.5.76 - 29.6.79. Palkkeja oli 9 kappaletta, joista yksi oli käsittelemätön vertailukoekappale, kolme oli lakattuja, kaksi kreosoottikyllästeistä, yksi suolapainekyllästetty ja kaksi oli käsitelty "Basiment LB" -nimisellä suoja-aineella. Palkit olivat ulkona avoimessa paikassa ja niiden sijoittelu oli kuvan 6.27 mukainen.



Kuva 6.27 Koekappaleiden sijoittelu ja tuenta Vierumäellä tehdyssä kokeessa.

Kokeen tarkoituksena oli selvittää, mikä kyllästys- ja pintakäsittely parhaiten kestää kosteusvaihteluja ja sopii parhaiten ulkoilmaan. Kosteudet mitattiin sähköisellä vastusmittarilla ja mittauspäivien väli vaihteli muutamasta päivästä puoleentoista kuukauteen.



Kuva 6.28 Vierumäellä suoritettu eri tavoin käsiteltyjen palkkien kosteusseuranta.



Parhaiten kokeista selvisivät kreosoottikyllästeiset palkit, sillä niiden kosteus ei missään vaiheessa koetta ollut yli 15,5 %, eikä palkkeihin syntynyt halkeamia. Kokeen jälkeen palkit olivat uuden veroiset.

Korkeimpia kosteuksia mitattiin suolapainekyllästetystä palkista, mutta kosteusmittarin on todettu näyttävän 1 - 2 % enemmän kuin muilla käsittelyillä, sillä suolaionit nopeuttavat elektronien liikettä. Näiden palkkien kosteuspitoisuus ei ole merkittävästi suurempi kuin muillakaan palkeilla. Lakatun palkin kosteus oli usein suurempi kuin käsittelemättömällä palkilla. Tämä johtuu siitä, että vesi ei haihdu palkista helposti lakan alle tunkeuduttuaan. Lakkaus oli kuitenkin hilseillyt useista kohdista pois ja palkit olivat näiltä kohdin tummuneet. Ehjä lakkaus hidastaa veden liikettä molempiin suuntiin.

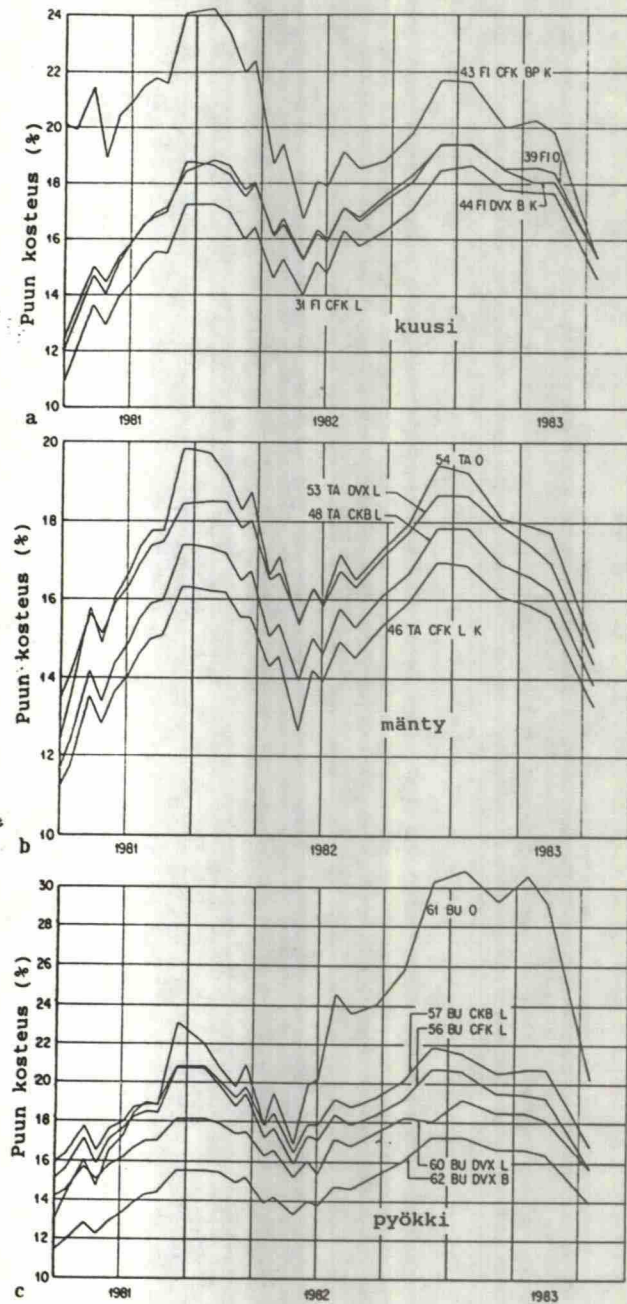
Palkkien kosteusmittaukset on esitetty kuvassa 6.28. Samassa on myös ilman kosteus.

Saksassa on tutkittu suola- ja öljykyllästettyjen liima-puupalkkien säänsietokykyä./68/ Palkit oli valmistettu eri puulajeista: kahta eri kuusilajia ( *Picea abies* ja *Abies alba* ), mäntyä (*Pinus sylvestris*) ja pyökkiä (*Fagus sylvatica*). Osa palkeista oli käsitelty öljyliukoisella suoja-aineella, osa vesiliukoisella, ja mukana oli myös käsittelemättömiä vertailukoekappaleita.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kosteuspitoisuuden muutoksia, kutistumista ja laajenemista sekä lamelli-en siirtymistä eri tasoon eli pinnan muuttumista epätasaiseksi. Myös kyllästeiden vaikutus sienien ilmes-tymiseen oli tarkastelun kohteena. Kuvassa 6.29 on esi-tetty palkkien kosteuspitoisuudet.

Eri käsittelyjen vaikutus puun kosteuspitoisuuteen on erittäin selvästi havaittavaissa, selvemmin kuin Vierumäen kokeessa. Kaikilla puulajeilla nousee

käsittelemättömän koekappaleen kosteus huomattavasti käsiteltyjen kosteutta suuremmaksi. Sienien vastustuskykyjen eroja ei kokeen lyhyiden vuoksi voitu vertailla.



Kuva 6.29 Keskimääräisen kosteuspitoisuuden aikariippuvuus liimapuupalkeilla, kuusi (FI), mänty (TA) ja pyökki (BU). Kyllästeet vesiliukoiset (CFK/CCF) ja öljypohjaiset (D). /68/



Espoossa sijaitsevassa autotalossa on liimapuiset pääkannattajat 6 m:n välein ja niiden jänneväli on 24 m. Nämä palkit poikkeavat muista tutkituista kohteista, sillä näissä on paljon reikiä. Halkeamat ohjautuivat useissa tapauksissa reiältä toiselle, tosin pysyivät joissakin kohdin koko matkan samassa lamellissakin. Halkeamien pituus vaihteli, mutta oli yleensä useita metrejä. Kuvassa 6.30 näkyy halkeamia, jotka näissä palkeissa sijaitsevat 7 - 8 lamellin välein. Takana olevasta palkista nähdään muuallakin tehty havainto: alin halkeama sijaitsee noin neljän lamellin päässä alareunasta.



Kuva 6.30 Halkeamia liimapuupalkissa. Autohalli Espoossa.

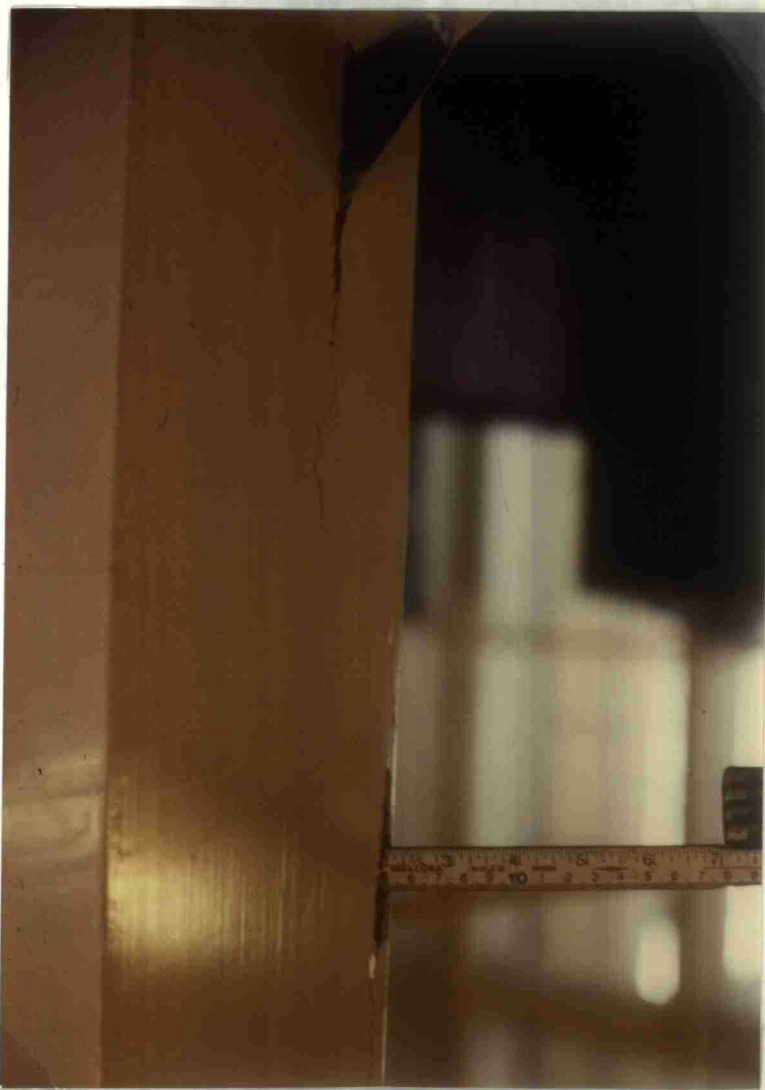
Kuvassa 6.31 näkyy halkeaman syvyys reiän kohdalla. Halkeama ulottuu lähes 206 mm leveän palkin puoleenväliin.



Kuva 6.31 Halkeaman syvyys reiän kohdalla on tässä lähes puolet 206 mm leveästä palkista.

Kirurgisen sairaalan peruskorjauksen yhteydessä Helsingissä selvitettiin vanhojen puurakenteiden halkeamia. Puisissa pilareissa oli kuivumishalkeamia, joiden syvyys oli noin 50 mm. Maalit olivat halkeamien kohdilta halkeilleet, joten halkeamat oli helppo havaita. Kuvassa 6.32 on pilarin halkeamia.





Kuva 6.32 Halkeamia puupilarissa. Kirurginen sairaala, Helsinki.

Ulkona oleva kevyen liikenteen silta Hyrylässä on erilainen rakenne kuin tässä kappaleessa esitellyt muut kohteet. Silta on melko uusi, liimapuun valmistusmerkeissä on luku 1985. Tällainen rakenne on melko harvinainen, mutta onnistuneena hyvä osoitus liimapuun monista käyttömahdollisuuksista. Silta on tehty painekyllästetystä liimapuusta, siis männystä, ja pinta on lakattu. Rakenteen suunnittelussa on jätetty huomiomatta muutama rakenteellinen seikka. Kaiteiden pystytolppien yläpäät ovat suojaamatta, kuva 6.33. Pinta on viistetty hieman vinoksi, mutta vesi imeytyy puuhun kuitenkin syynsuunnassa helposti.



Kuva 6.33 Liimapuisen jalankulkusillan kaiteen yläpää. Hyrylä.

Kuvasta havaitaan, miten liimasaumat ovat auenneet ja lamellissa on säteen suuntaisia halkeamia. Vesi pääsee puun sisään ja kulkeutuu alaspäin syyn suunnassa. Halkeamat liimasaumoissa ulottuivat jopa noin 500 mm:n päähän yläreunasta. Halkeamia oli kaikissa pystytolpissa.

Toinen rakenteellinen virhe on pääkannattajan muotoilussa. Liimapuun lamellit on asetettu karelle alapinnan mukaan, jolloin yläpinnassa olevat lamellit ovat leikkauspinta ylöspäin. Tämä pinta imee helposti vettä, joka kulkeutuu syynsuunnassa kaaren sisään, kuva 6.34. Yläpinnan lakkaus on jo nyt kulunut pois ja pinta on tummunut ja halkeillut, kuva 6.35.





Kuva 6.34 Liimapuisen jalankulkusillan reunan muotoilu.



Kuva 6.35 Lakkaus on kulunut pois ja pinta halkeillut ja tummunut väärin muotoillun kaaren vuoksi.

## 6.7 Pinnoitekokeet

Pinnoitteiden tiiviyyttä on tutkittu paljon eri maissa. Puurakenteille on kokeiltu erilaisia pinnoitteita ja testattu niiden säänsietokykyä. Jokaisella maalinvalmistajalla on omat kokeensa, joista suurin osa tehdään salaisena tuotekehitystyönä.

### Liimapuupalkkien pinnansuojaus

Karlsruhen yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa /72/ haluttiin selvittää ja vertailla eri pinnansuojausaineiden kykyä suojata liimapuupalkkeja liian nopealta kuivumiselta ja sitä seuraavalta halkeilulta. Tutkimus oli yksityisen pinnoitevalmistaman tilaama, ja tilaajan tuote oli Basiment LB. Muut kokeessa olleet pinnoitteet oli nimetty koetuote D.J.F ja koetuote 1522/2. Mukana oli vertailukoekappaleina käsittelemättömiä palkkeja.

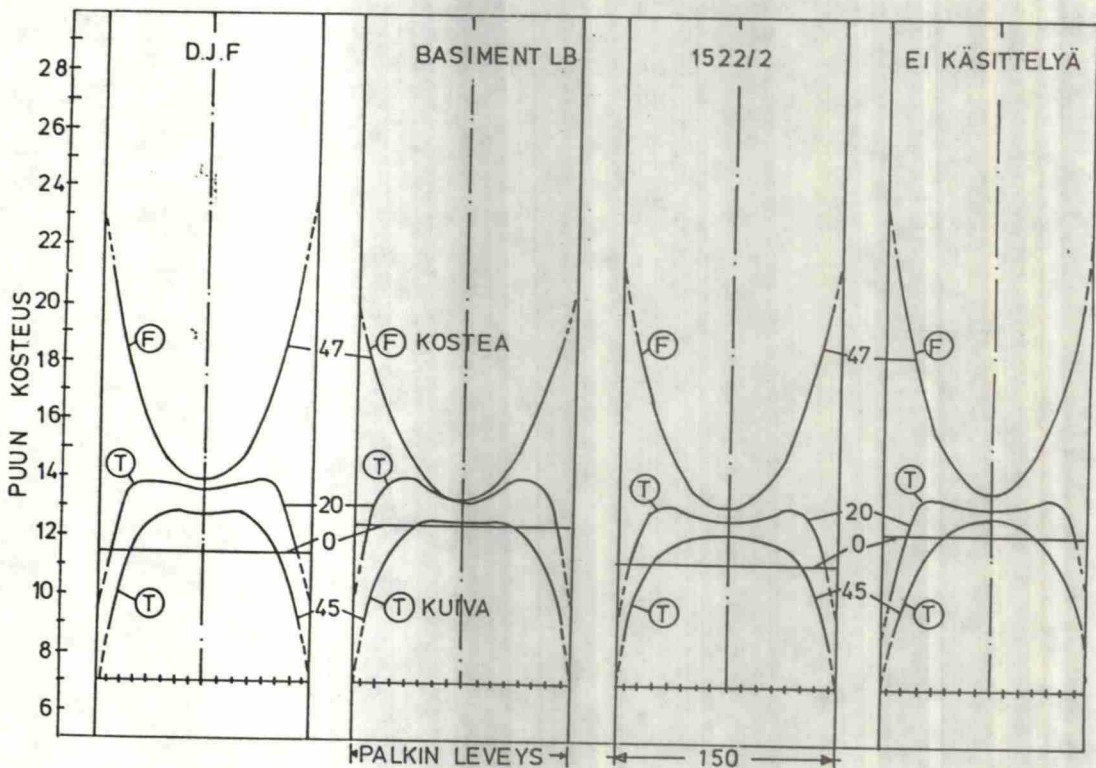
Kahdeksan palkkia, kooltaan 150 x 450 x 600, jaettiin siten, että osa pidettiin kastelun ja kuivauksen jälkeen normaali-ilmassa ja osa kuivassa ilmassa. Käsittelemättömiä vertailukappaleita oli molemmissa. Lammellien paksuus oli 30 mm. Koekappaleita varastoitiin valmistuksen jälkeen kokeen alkamiseen asti noin kaksi kuukautta +20 °C:ssa ja kosteudessa 65 %RH. Kappaleita pidettiin 47 päivää kosteassa huoneessa, minkä jälkeen niiden kosteusjakaumat määritettiin. Kappaleet puolitettiin osiin 1 ja 2, joista 1-kappaleet joutuivat takaisin normaali-ilmaan N ja 2-kappaleet pantiin kuivaan ilmaan T. Palkeista määritettiin kosteusjakaumat 20 ja 45 päivän kuivumisajan kuluttua. Kokeiden tulokset on esitetty kuvassa 6.36.

Puun kosteusjakauma koekappaleiden leveyden yli oli parabolinen. Koekappaleita verrattaessa tarkasteltiin 10 mm leveitä reunakaistoja. Aineen vaikutus palkin kostustilaan arvosteltiin vertaamalla kostean ja kuivan ilman



pintakaistojen kosteuksia. Mitä suurempi ero on, sitä suurempi on kosteusliike pinnalla. Kosteussuoja-aine DJF:llä oli huono suojausvaikutus, pinnan kosteus nousi lähes käsittelemättömän palkin kosteuteen ja ero kuivan ja kostean ilman kosteuksissa pinnassa oli 13 %. Pienin pinnan kosteus oli Basiment LB:llä käsitellyssä palkissa, vain 9 %.

Halkeilun selvittämiseksi koekappaleet tutkittiin ennen kokeen alkua ja halkeilua tarkkailtiin kokeen aikana. Kuivauksessa normaali-ilmassa halkeili vain suojaamaton koekappale, mutta kuivassa ilmassa halkeili myös DJF:llä käsitelty palkki.

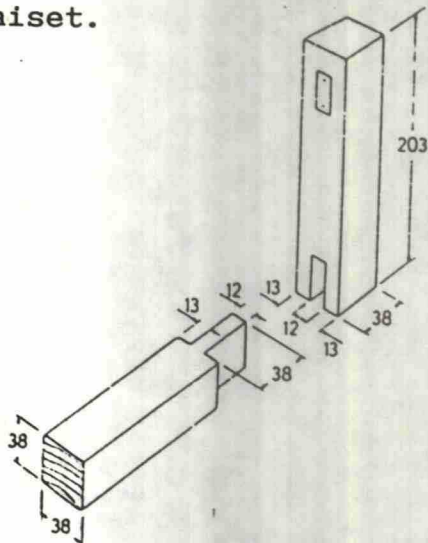


Kuva 6.36 Kosteusjakaumat koekappaleissa. Vasemmalla käsittely DJF:llä, sitten Basiment LB:llä, seuraavana 1522/2 ja oikealla käsittelemätön. /72/

Suojaamattomassa koekappaleessa esiintyi runsaasti halkeamia. Tämä tukee sitä käsitystä, että liimapuupalkkien suojaaminen kosteussuoja-aineella on välttämätöntä, mikäli on syytä olettaa liimaus- ja käyttökosteuksissa eroja.

#### Ikkunan nurkkaliitosten suojaus

L-muotoisten nurkkaliitosten suojausta on tutkittu runsaasti, sillä ikkunoiden säänkestävyys ja maalauksen pysyvyys on pääasiassa riippuvainen nurkkien vedenpitävyydestä. Koekappaleen mitat ovat yleisesti kuvan 6.37 mukaiset.

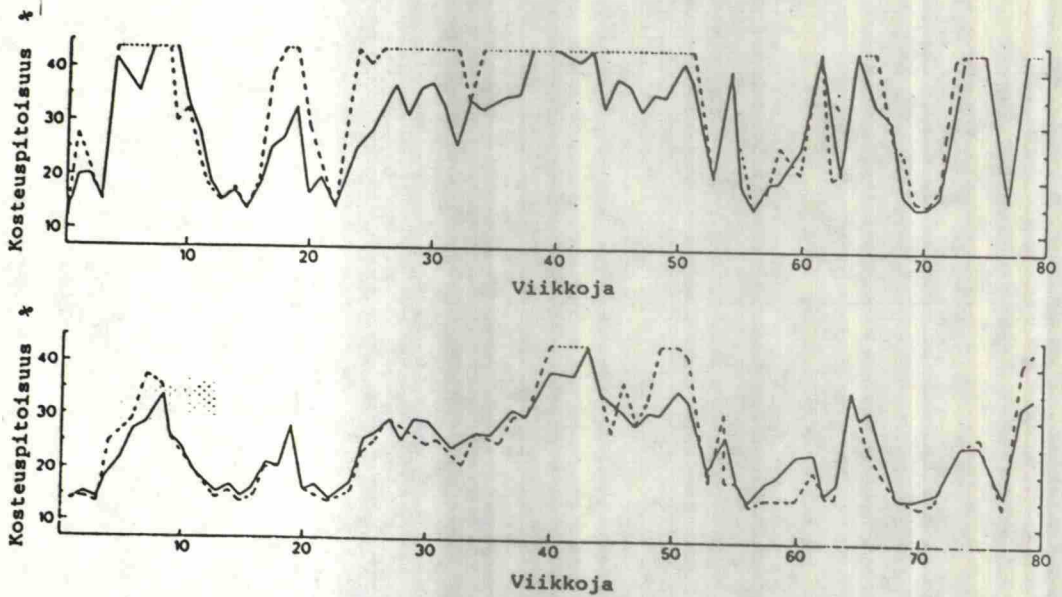


Kuva 6.37 L-muotoisen nurkkaliitoksen mitat mm:inä./69/

Kokeissa /69/ tutkittiin nurkkaliitoksia kuvan 6.37 mukaisilla koekappaleilla. Koekappaleet tehtiin männyn pintapuusta ja puutavara valikoitiin siten, että se oli suorasyistä ja oksatonta. Pitkät sivut suojattiin alkydimaalilla. Päättyihin kokeiltiin kolmea eri pinnoitetyyppiä: perinteinen kolminkertainen alkydimaalaus, akryyliemulsiomaalaus ja puoliläpäisevä puunsuojaus. Koekappaleet asetettiin telineisiin 10°:n kulmaan, eteläänpäin. Kosteuspitoisuudet mitattiin mikroaaltomittarilla molemmista L-kappaleen puoliskoista, 75 mm:n päässä nurkasta. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 6.38 -6.41.

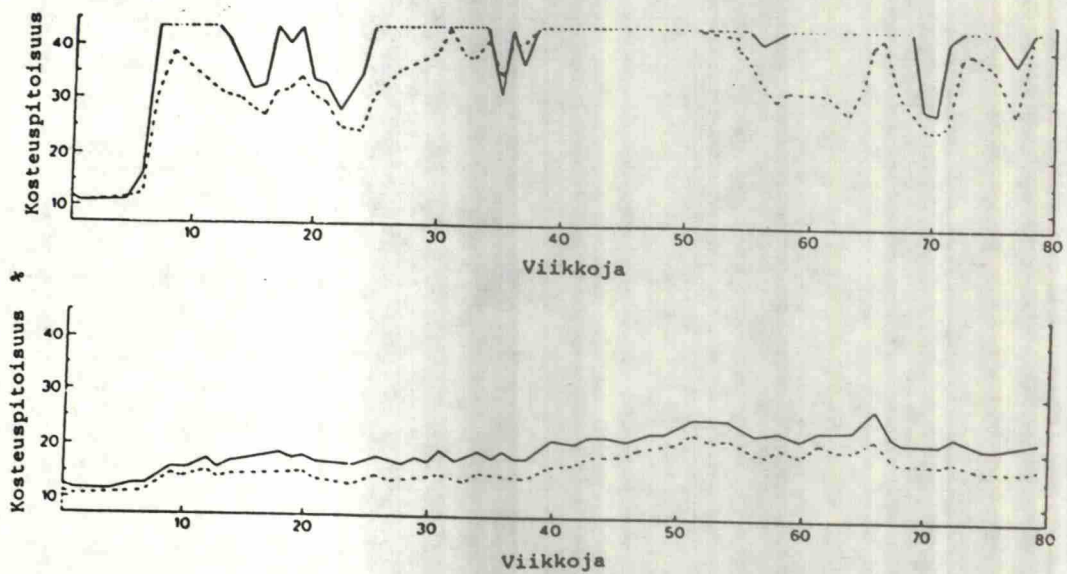


----- pystypuu  
 ————— vaakapuu  
 ..... skaalan ylitys



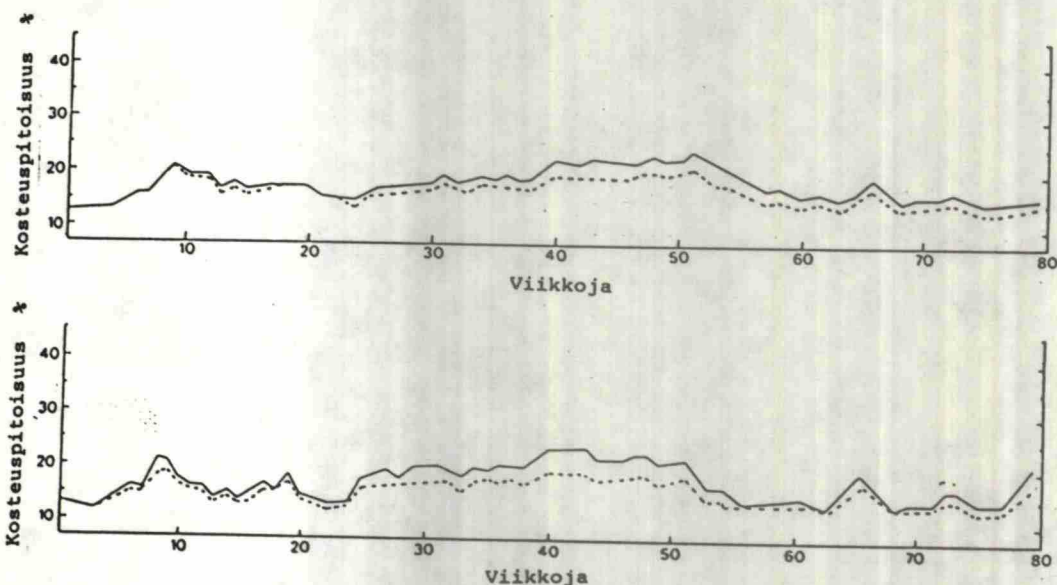
Kuva 6.38 L-kappaleiden kosteuspitoisuudet. Yllä maalaa-maton ilman päätysulkemista. Alla maalaamaton, jossa päädyt on suojattu./69/

----- pystypuu  
 ————— vaakapuu  
 ..... skaalan ylitys



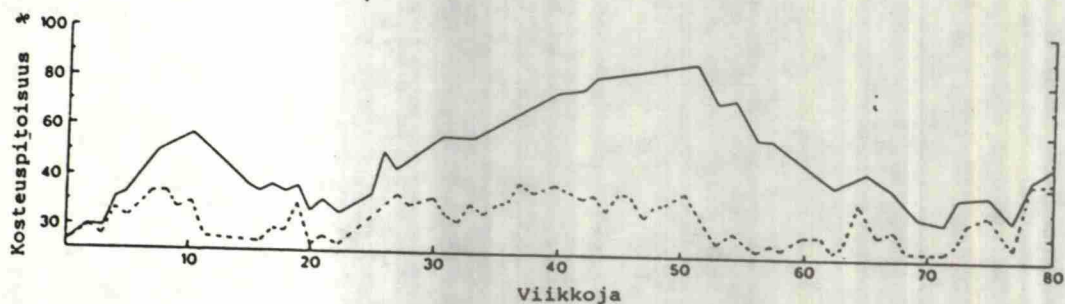
Kuva 6.39 L-kappaleiden kosteuspitoisuudet. Yllä alkydi-maalilla maalattu ilman päätysulkemista, alla alkydimaali ja päätysuojaus./69/

--- pystypuu  
— vaakapuu



Kuva 6.40 L-kappaleiden kosteuspitoisuudet. Yllä alkydimaali päätysuljettu ja alla ulkokäyttöön tarkoitettu puunsuoja, päädyt suljettu./69/

--- maalaamaton, päätysuojattu  
— alkydimaalaus, ilman päätysuojausta



Kuva 6.41 L-koekappaleiden kosteuspitoisuudet mitattuna painonmuutoksen avulla./69/

Täysin käsittelemättömillä koekappaleilla, kuva 6.38, pystysuoran osan kosteuspitoisuus oli lähes puolet mittausajasta yli 40 %, mikä on mittarin asteikon maksimi. Vaakasuora osa pysyi melko kuivana. Kun tätä verrataan maalaamattomaan, mutta päätysuojattuun, havaitaan koste-



uspitoisuuksissa suuri ero. Pääty suojatun kosteus nousi suureksi vain muutamaksi viikoksi talven lopulla ja laski taas nopeasti.

Kuvan 6.39 maalatut, mutta päätysulkemattomat koekappaleet pysyivät kuivina kunnes muutaman viikon päästä kokeen alkamisesta liitoskohdan maalikalvo repesi. Sen jälkeen vesi pääsi suoraan liitoskohtaan, mikä näkyy käyrän jyrkkänä nousuna. Tämä todistaa edelleen sitä, ettei pelkkä maalikalvo riitä suojaamaan päätypuita huonon elastisuutensa vuoksi. Kuvaajasta huomataan myös se, että kosteus pysyi lähes koko kokeen ajan yli 30%:ssa ja oli yli puolet ajasta jopa yli 40 %, mikä on mittausasteikon maksimi.

Koe osoitti, että puun pohjamaalaus, pienikin määrä päätypintoihin siveltynä, on tehokkaampi kuin kolminkertainen maalaus kaikille muille pinnoille. Erittäin hyvä suoja on alkydimaalaus pitkille sivuille ja päätysuoja-aine päätyihin, kuvan 6.40 alempi kuva.

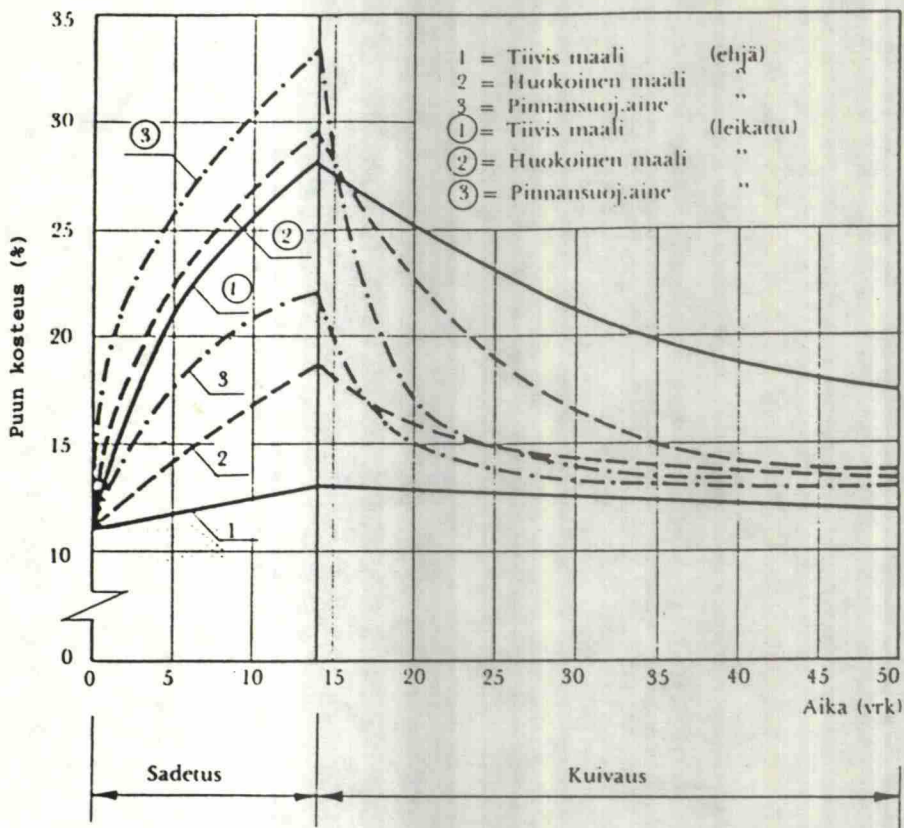
Maalien suuria eroja kuvaa se, että jo näin lyhyellä ajalla, 80 viikkoa, tuli puiden kosteuspitoisuuksiin suuria eroja. Päätyulkemattomien kappaleiden maalissa päädyn lähellä oli halkeamia, värjäytymiä sekä selvästi havaittavaa lahottajasienten ilmestymistä.

Artikkelin /11/ kirjoittajat ovat kokemuksiinsa perustuen sitä mieltä, ettei ikkunan sisäpuolen tiiviydellä ja ulkopuolen läpäisevyydellä ole merkitystä. Pääasiallisena syynä vaurioon on rakenteen suoranainen kontakti veteen. Maalatut puukappaleet asetettiin kaksiosaisen ilmastokammion väliseiniksi lämpötilan ollessa eri puolilla eri suuruinen. Vaikka kosteuspitoisuus oli molemmin puolin lähes sama, lämpötilaero aiheutti sen, että absoluuttinen veden määrä oli erilainen. Näin aiheutui kappaleisiin kosteusgradientti ja kosteus virtasi lämpimästä kylmään. Pinnoitteen tiiviys vaihteli eri puolilla. Mitään ratkaisevia eroja ei havaittu maalaamattomien ja avoimilla tai tiiviillä maaleilla käsiteltyjen koekappaleiden kosteussisällössä. Kosteus ei yhdessäkään koekappaleessa noussut huolestuttavasti. Samoin todettiin, että vauriot yleensä sijaitsevat pokien ja karmien alaosissa, jotka ovat erityisen alttiita vedelle.

#### **Pinnoitteen tiiviys**

Pinnoitteen tiiviyn vaikutusta puun kosteuteen on tutkittu eri tavoin käsitellyillä koekappaleilla, kuva 6.42. /5/. Kappaleita pidettiin sadetuslaitteessa ja sen jälkeen niiden annettiin kuivua vakio-olosuhteissa. Alempien käyrien tilanteessa pinnoitekalvo on ehjä, toiset kolme käyrää kuvaavat tilannetta, jossa kalvo on vaurioitunut. Kappaleet vaurioitettiin tekemällä jokaiseen kapea viilto, näin haluttiin kuvata käytännön tilannetta.





Kuva 6.42 Pinnankäsittelyn vaikutus puun kostumiseen ja kuivumiseen. Puulaji kuusi. /5/

Kosteuden nousu on erittäin vähäistä tiiviillä maalilla käsitellyssä koekappaleessa. Pinnansuojausaineella si-  
vellyn puun kosteus kohoaa huomattavan korkeaksi, eli  
tämä on huono kosteussuoja. Toisaalta kuivuminen on kui-  
tenkin nopeaa, joten lahoamisvaara on vähäinen. Huokoi-  
nen kalvo estää kosteuden imeytymistä pinnansuojausainet-  
ta paremmin, mutta kuivuminen on myös hitaampaa.

Kaikkien vaurioitettujen koekappaleiden kosteus kohosi  
huomattavan korkeaksi. Tiiviskalvoisen kappaleen kuivu-  
minen oli muihin verrattuna hidasta, jolloin lahoamisvaa-  
ra rakenteessa on suuri.

Artikkelin /16/ mukaan paras tulos ikkunoiden käsittelys-  
sä saadaan, kun ulkopinnat käsitellään peittävällä, melko  
huokoisella maalilla ja sisäpintojen käsittelyyn käyte-

tään tiivistä maalia tai lakkaa. Hoidon säännöllisyyttä korostetaan , sillä mikään pinnoite ei kestä hoitamatta ikuisesti. Huoltomaalausten välin tulisi tämän mukaan olla 5 -10 vuotta, pinnansuojausaineilla väristä riippuen kahdesta viiteen vuoteen.

VTT:llä on tutkittu eri tavoin pohja- ja pintakäsitteltyjen mänty- ja kuusisahatavarakappaleiden säänkestävyyttä /7/. Tässä kokeessa oli männyllä kuusi erilaista pohjakäsittelyä ja kuusella kaksi. Pintakäsittelyjä oli molemmilla viisi. Kenttäkoe oli lyhyt, se kesti syyskuun alusta kesäkuun loppuun. Tätä ennen oli tehty laboratoriossa sääkoe esikokeena, ja sen tuloksena oli havaittu, että halkeamat maalipinnassa johtuivat yleensä puun halkeilusta. Vauriot olivat kuusikappaleissa yleensä keskimäärin huomattavasti vähäisempiä kuin mäntykoekappaleissa. Kun kokeen alussa oli ollut sekä laboratoriossa että varsinaisessa kokeessa vauriaina vain halkeamia, lisääntyivät pinnoitevauriot kokeen loppupuolella, kun maalit alkoivat hilseillä halkeamien reunoilta. Kestävimmiksi osoittautuivat öljyliukoisella B-luokan kyllästeellä käsitelty mäntysahatavarakappaleet. Niissä hättana oli kuitenkin kyllästeen aiheuttama valkoisten maalien kellertyminen. Laboratoriokokeessa polyuretaanimaali ja peittävä puunsuoja olivat muita parempia, alkydimaali oli lähes yhtä hyvä halkeamien estäjä. Eniten halkeamia oli lateksilla maalatuissa koekappaleissa ja näissä oli myös hättana homehtuminen.

Kenttäkokeessa huonoin oli öljymaali, sillä se irtosi alustastaan. Myös tässä lateksi oli huono. Kaikenkaikkiaan todettiin, että kuusella oli parempi säänkestävyys kuin männyllä, se halkeili ja sinistyi vähemmän. Samaan lopputulokseen on tullut myös Sell /12/ tutkimuksissaan. Hän on todennut männyn olevan aina kosteampaa kuin kuusen, jos säilytys ja pintakäsittely on ollut samanlainen. Veden imeytymisen ehkäisy onnistui myös



kyllästämällä puu sienimyrkyttömällä öljyliukoisella kyllästeellä. Öljyliukoiset kyllästeet estivät parhaiten halkeilun.

### Julkisivut

Julkisivujen kuntoselvityksessä /13/ tutkittiin yhteensä 65:n rakennuksen puisen julkisivun kunto. Talojen ikä oli 2-10 vuotta. Lateksipintaisia oli 38 kpl, kuullote-pintaisia 23 kpl ja neljä oli maalattu öljy-alkydimaalilla. Arvostelussa tärkeitä seikkoja olivat pinnan halkeilu, oksien ja naulojen näkyminen, biologiset vauriot ja pinnan kuluminen. Yleisarvosteluun kuuluivat kaikki seinät, mutta tarkempi arvostelu tehtiin huonoimmasta seinästä, joka oli kaikilla maalityypeillä etelän puoleinen seinä. Pinnoitteen kestävyysvaikutukset merkittävästi ilmastolliset tekijät, sekä ympäristön suojaava vaikutus. Lateksipintojen laatuun vaikuttivat puupinnan karheus, oksaisuus ja oksien käsittely. Kuullotteiden laatuun vaikuttivat merkittävästi puulajien ja pinnan karheuden erot. Kuusi oli parempi maalausala kuin mänty, sillä halkeilua ja oksien näkymistä oli vähemmän. Höylätty lauta oli tulosten mukaan huonompi alusta kuin sahattu. Pinnoitteen värillä näytti olevan vaikutusta kuullotteilla käsitellyissä seinissä : valeat värit olivat kestävämpiä kuin tummat.

### 6.8 Sääkokeet

Puupinnan kulumisnopeutta sään vaikutuksesta on tutkittu sekä Suomessa että ulkomailla tehdyillä sääkokeilla. Kokeiden avulla on kerätty tietoa puun harmaantumisesta, tummumisesta, halkeilusta ja nukkaantumisesta. Erilais-ten pinnoitteiden vaikutuksesta säänkestävyyteen on haluttu saada tietoja, sekä erityisesti useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta pitkän ajan kuluessa.

Puun tiheyden vaikutusta eroosion suuruuteen on tutkittu amerikkalaisilla puulajeilla /19/. Säälaitteiston avulla oli koestettu 12 lehtipuu ja 6 havupuu koekappaleita, joista mitattiin pinnan eroosiota mikroskoopilla 600 tunnin välein. Koekappaleet testattiin nopeutetulla sääkokeella laboratoriossa. Kyseisellä laitteistolla 2400 tuntia keinotekoista sääkoetta vastaa 4 vuoden ulkona tehtyä koetta, jossa koekappale on etelänpuoleisella seinällä. Koekappaleiden koko oli  $32 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$ , paitsi eurooppalaisilla puulajeilla ( kuusi ja pyökki )  $75 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$ .

Kun puun tiheys oli välillä  $300 - 1000 \text{ kg/m}^3$ , havaittiin lähes lineaarinen riippuvuus puun tiheyden ja eroosion suuruuden välillä. Muilla tiheyksillä ei lineaarisuutta ollut.

Käsittelemättömien koekappaleiden sääkokeita on tehty paljon myös Sveitsin Materiaalintestaus ja Tutkimuslaboratoriossa ( EMPA ). Artikkelit /20/ kertoo kokeista, jotka suoritettiin 20:llä eri puulajilla, joista osa oli Sveitsissä käytettäviä ja osa Euroopan ulkopuolelta. Puulajit olivat eri tiheyksisiä, niillä oli erilaiset lujuusominaisuudet ja niiden biologinen lahottajien vastustuskyky vaihteli. Koekappaleet asetettiin laboratorion katolle  $45^\circ$  :n kulmaan, kohti etelää yhden vuoden ajaksi. Samanaikaisesti vertailukoekappaleina olleet kaksi havupuista koekappaleita asetettiin keinotekoiseen sääkokeeseen laboratorioon.

Kokeen loputtua kaikki katolla olleet puupinnat näyttivät yhtä kuluneilta ja harmailta. Eroja ei ollut havaittavissa edes mikroskooppisella tasolla. Keinotekoisessa sääkokeessa olleet koekappaleet olivat selvästi vähemmän kuluneita. Niissä ei näkynyt homesienen aiheuttamaa harmaantumista, kuten luonnollisessa sääkokeessa olleilla koekappaleilla. Erään kuusikoekappaleen (Albies alba) pinta oli ulkoilmassa tehdyn kokeen jälkeen selvästi



harmaa, kun taas keinotekoisessa sääkokeessa olleen kappaleen pinta oli pysynyt lähes valkoisena.

USA:ssa Wisconsinissa tehdyssä tutkimuksessa /21/ verrattiin keinotekoista ja luonnollista sääkoetta toisiinsa. Koekappaleet olivat western redcedar -puun sydänpuuta, kooltaan  $114 \times 63 \times 10 \text{ mm}^3$ . Mukana oli sekä hitaasti kasvanutta että nopeasti kasvanutta puuta. Koekappaleet asetettiin pystysuoraan kohti etelää siten, että syynsuunta oli vaakasuorassa, ja jokaiseen kappaleeseen kiinnitettiin alumiinivanne, jotta pinnan kulumista oli helppo seurata.

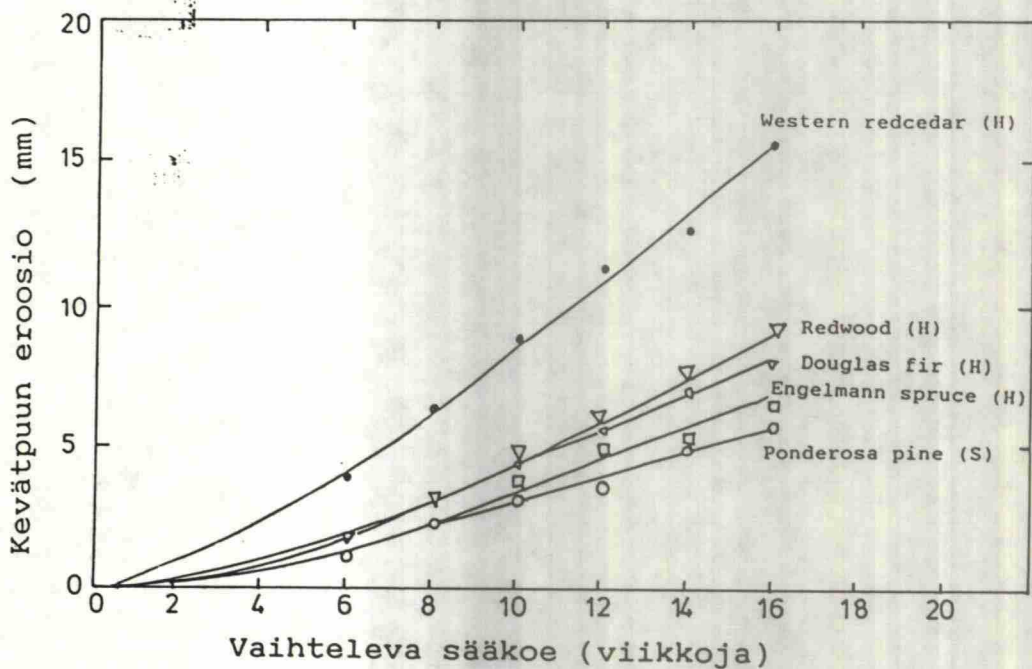
Kuuden vuoden kuluttua kokeen alkamisesta kahdeksan koekappaletta siirrettiin ulkoilmasta pois, niiden pinnat tasattiin ja ne laitettiin keinotekoiseen sääkokeeseen.

Kulumisen syvyyttä mitattiin ulkonaolevista kappaleista vuoden välein ja laboratoriokoekappaleista 4 viikon välein. Keinotekoinen sääkoe koostui 24 tunnin jaksoista, joissa jokaisessa oli 20 tuntia valoa ja 4 tuntia ruiskutettiin vettä pinnoille valon aikana.

Koekappaleiden ulkonäkö sisällä ja ulkona koestetuilla koekappaleilla oli kokeen jälkeen samanlainen. Puulaji western redcedar kului ulkokokeessa 1,1 mm 8 vuodessa, mikä vastaa 12,7 mm 100 vuodessa näillä koekappaleilla. Tämä on aikaisempaan verrattuna kaksinkertainen arvo. Kuluminen kevätpuulla sekä hidas- että nopeakasvuisella puulla oli yhtä suurta sekä ulkona tehdyssä että laboratoriokokeessa. Kesäpuun molempien materiaalien koekappaleet olivat paljon vähemmän kuluneita molemmissa kokeissa. Kuitenkin kahden vuoden ulkonaolon jälkeen samoin kuin 15 - 20 viikon sääkokeessa eroosion suuruus hitaastikasvaneella kesäpuulla kasvoi selvästi ja jatkui samansuuruisena kuin hitaastikasvaneella kevätpuulla. Tämä muutos kuvaa ohuiden, helposti hajoavien kevätpuun solujen hajoamista.

Eroosion suuruus nopeasti kasvaneella kesäpuulla kasvoi kahden vuoden ulkonaolon jälkeen, samoin kuin 20 viikon laboratoriokokeen jälkeen. Kuluminen ulkonaolleelle kesäpuulle jatkui noin 70 % nopeastikasvaneen kevätpuun arvojen mukaisena.

Western redcedar kului eroosion vaikutuksesta huomattavasti nopeammin kuin muut puulajit, joita koestettiin laboratorio-olosuhteissa /21/. Tämä saattaa ainakin osittain johtua sen tiheydestä  $300 \text{ kg/m}^3$ , kun muilla tiheys oli suurempi, esim. Ponderosa männyllä  $550 \text{ kg/m}^3$ . Muita vaikuttavia tekijöitä ovat ligniini- ja uutepitoisuus, sillä Douglas-kuusi, jonka tiheys on koestetuista puulajeista suurin, kului lähes saman verran kuin redwood, jolla tiheys on keskiluokkaa kyseisistä koekappaleista.



Kuva 6.43 Puun kuluminen nopeutetussa sääkokeessa./21/  
H=sydänpuu  
S=kevätpuu



Laboratorio-olosuhteissa tehty sääkoe on käyttökelpoinen menetelmä tutkittaessa puun vanhenemista sään vaikutuksesta. Aiemmin oletettiin neljän viikon nopeutetun laboratoriokokeen vastaavan yhden vuoden koetta ulkona. Myöhemmin tehtyjen kokeiden perusteella on saatu tuloksia, joiden mukaan sääkokeen alussa 6-9 viikkoa nopeutettua koetta vastaa yhden vuoden ulkona tehtyä koetta. Kun koe jatkuu, suhde tippuu: noin 5 viikkoa nopeutettua koetta vastaa vuoden ulkonaoloa.

#### 6.9 Puurakenteiden kenttätutkimusmenetelmät

Puurakenteiden kenttätutkimuksia on maassamme tehty vähän. Tarvetta olisi ollut, mutta asiaan ei ole paneuduttu ja tehdyt tytkimukset ovat tästä syystä jääneet helposti puutteellisiksi.

Puurakenteista tutkitaan halkeamia, lahovaurioita, värinmuutoksia ja homevaurioita. Lahoamisen määrää ja esiintymisalueen suuruutta voidaan määrittää puun kovuusmittauksilla. Lahovaurioista on otettava valokuvia ja mahdollisesti näytteitä sienestä, jotta sienilaji voidaan selvittää. Silmämääräisesti voi kokenut tutkija oppia määrittämään useimmat sienilajit, mutta tarkempi selvitys laboratoriossa voi olla tarpeen lattiasientä epäiltäessä. Korjattaessa lattiasienen aiheuttamia vaurioita on puuosien poistamisessa oltava tarkempi sen muita sieniä paremman vedensiirtokyvyn vuoksi. (vrt. luku 3.1)

Halkeamista mitataan niiden syvyyttä, leveyttä ja pituutta sekä määritetään halkeaman sijainti. Erityisesti liimapuisissa rakenteissa on kiinnitettävä huomiota siihen, kulkevatko halkeamat lamellissa vai lamellien välisessä liimasaumassa. Halkeamien sijaintiin pitää kiinnittää huomiota. Jos ne sijaitsevat eniten rasitetuissa kohdissa, ne voivat heikentää rakenteen kantokykyä

huomattavasti. Jos palkeissa on reikiä, niiden kohdilta voi yrittää mitata reiästä lähtevien halkeamien syvyyttä. Palkkien ohuita halkeamia ei aina huomaa kauempaa, koska ne muistuttavat helposti liimasaumaa. Tutkiminen tulee tehdä siis niin läheltä kuin mahdollista.

Mikäli palkin kosteus poikkeaa huomattavasti valmistuskosteudesta, voidaan kosteuseron suuruuden perusteella yrittää arvioida, onko kyseessä kosteusmuodonmuutoksesta johtuva halkeama. Jos kosteus ei paljoa poikkeaa valmistuskosteudesta, eikä kosteushistoriassa ole suuria kosteudenvaihteluita, kyseessä on ilmeinen palkin jännitystilasta johtuva halkeama.

Tutkimuskohteeseen tutustumisesta on sovittava etukäteen, siten että pääsee esteettömästi ja tilassa tapahtuvaa toimintaa häiritsemättä tekemään tarkasteluja ja mittauksia. Henkilökunnan ja asukkaiden apua kannattaa aina kysyä, sillä sen lisäksi, että pääsee kaikkialle, minne tiloissa haluaa, saa tietoa rakennuksen käytöstä ja mahdollisesti myös sen menneisyydestä. Kohteen rakennuspiirustukset ja niihin liittyvät detaljit on hankittava käyttöön ja tarkistettava niiden paikkansapitävyys. Mikäli mittavirheitä on, tehdään uudet mittapiirustukset mahdollista korjaustyötä varten. Kaikenlainen arkistotieto, valokuvat ja mahdolliset viranomaislausunnot ym. asiakirjat ovat apuna rakennuksen menneisyyden ja tehtyjen korjaustoimenpiteiden selvittämisessä. Tietoa rakennuksesta kannattaa aina kysyä joltakin rakentamisen aikaiselta vastuuhenkilöltä, kuten vastaavalta mestarilta, mikäli kohde on niin uusi, että tällainen on mahdollista.

Tutkimusvälineitä tulee olla matkassa, joskin pelkällä silmämääräiselläkin tarkastelulla saadaan yleisellä tasolla käsitys vaurioiden määrästä ja laajuudesta. Tutki- ja pystyy havainnoimaan katselemalla, kuuntelemalla, haistelemalla, koputtelemalla ja tunnustelemalla



rakenteita. Seuraavat välineet muodostavat peruslistan tutkimuksissa tarvittavista välineistä. Kohteiden erilaisuudesta johtuen saattaa listasta puuttua erityistutkimusvälineitä, joiden tarve on harkittava tapauskohtaisesti.

- mitta
- piikki
- kamera
- näytteenottokaira
- ilmankosteusmittari
- puunkosteusmittari
- lämpömittari
- taskulamppu
- rakotulkki
- kiikari
- tikkaat

Puurakenteiden onkaloihin ja vaikeapääsyisiin ja ahtaisiin paikkoihin tähyttäminen voidaan tehdä jäykkään putkeen ja peileihin perustuvalla endoskoopilla tai fiberoskoopilla, jonka toiminta perustuu optisiin kuituihin. Rakenteiden onkaloita ja halkeamia voidaan paikallistaa ultraäänitutkalla./65/

Mahdollisia virhetilanteita syntyy liian nopeiden johtopäätösten seurauksena. Jos rakennetta katsotaan kaukaa, saattaa tilanne näyttää väärältä ja myös johtopäätökset ovat vääriä. Kaikissa mittauksissa on laitteiden oltava luotettavia ja kunnossa. Puun kosteutta mitattaessa sähköisellä vastusmittarilla on varmistuttava, että lämpötila sekä puulaji on säädetty mittariin oikeiksi. Virheellisiä arvoja aiheuttavat oksankohdat sekä liimasaumat. Kosteus pitää mitata lamellien pitkittäissuunnassa siten, ettei liimasauma jää elektrodien välin. Elektrodien puristusvoiman vaihtelu on tärkein mittausvirheitä ja -eroja aiheuttava tekijä, jos useat eri henkilöt tekevät mittauksia. Puristusvoiman ollessa suuri vastus elektrodien välillä pienenee ja

mittari näyttää liian pieniä arvoja./65/

Painekyllästetystä puusta sähköisellä vastusmittarilla mitattaessa saadaan aina 1 - 2 prosenttiyksikköä suurempia arvoja kuin käsittelemättömistä puurakenteista samassa tilassa. Mitattavan puupinnan olisi oltava mahdollisimman puhdas. Pinnassa oleva lika vaikuttaa elektronien liikkeeseen mittausrvoja kasvattaen. Kaikki materiaali puun pinnalla vaikuttaa mittausrvoihin. Jos mittausrpiikit lyödään puuhun muovi- tai paperikalvon läpi, saadaan virheellisiä tuloksia. Kaikkia mittauksia kannattaa tehdä useampia samasta kohdasta, jotta virheelliset ja ääriarvot voidaan poistaa aineistosta. Näin luotettavuus paranee. Jos puun pinnassa on vettä, ei mittari näytä oikein. Rakenne on kuivattava ja mitattava uudelleen riittävän pitkän ajan kuluttua. Mittauksia tulisi tehdä pidemmän ajanjakson aikana, sillä hetkelliset kosteusmittaukset eivät saisi johtaa pitkälle vietyihin johtopäätöksiin. Huomioitava seikka on myös vuodenaika, jolloin mittaukset suoritetaan, sillä esim. lämmityskauden lopulla kevättalvella ovat halkeamat leveimmillään.

Vastusmittausmenetelmän tarkkuus on 95 %:n varmuudella mäntypuussa naulaelektrodeilla mitattaessa 1 %. Mittari toimii parhaiten puun kosteuden ollessa n. 8 - 20 %./65/



## 7 PÄÄTELMÄT

Puurakenteiden lahovaurioiden välttämiseksi tulee rakenteet suunnitella siten, että puun kosteuspitoisuus on kaikissa olosuhteissa alle 20 %:n, jota pidetään lahottajasiementen kasvun alkamiskosteutena. Vaurioitumisriski kasvaa puun kosteuden ollessa lyhyitäkin aikoja yli 20 % ja lämpötilan ollessa noin 25 °C.

Liimapuiset pääkannattajat ovat yleensä näkyvillä ja niiden pinnassa on usein kuivumishalkeamia, jotka johtuvat sisäisistä jännityksistä. Sisäiset jännitykset johtuvat pinnan ja sisäosien kosteuspitoisuuksien eroista olosuhteiden muuttuessa äkillisesti tai kun kosteusmuodonmuutokset on rakenteessa estetty. Liimapuun valmistuskosteus on 10 - 15 %. Rakenne voi pysyä halkeilemattomana kuivemmissakin olosuhteissa, mutta tällöin kosteudenmuutokset ovat olleet hitaita. Nopea usean prosenttiyksikön suuruinen kuivuminen saa aikaan suuremmat halkeamat kuin jännitysten syntyminen vähitellen tai ajoittaisen kastumisen ja kuivumisen johdosta. Puun poikittainen viruminen vähentää jännityksiä ja halkeamien syntymistä.

Liimapuurakenteissa halkeamat pyrkivät ohjautumaan sormijatkosten kohdalle sekä reikien, lovien ja pulttien aiheuttamien leikkausjännityshuippujen kohdalle. Tyypillinen halkeamakohta on lamellien lujuusluokan vaihtumiskohta  $h/6$  - mittaisen matkan päässä palkin alareunasta, mikä on yleensä 4 - 5 lamellia tavanomaisilla pääkannattajakorkeuksilla.

Palkkien halkeamat voivat johtua myös ulkoisten kuormien aiheuttamista liian suurista jännityksistä. Pelkkien kuormien aiheuttamat halkeamat ovat yleensä harvinaisia. Useimmiten halkeamien syynä on kuivumisen ja suurten kuormien yhteisvaikutus. Nämä halkeamat ovat pelkkiä

kuivumishalkeamia vaarallisempia, sillä kapasiteetin ylitystä seuraa aina murtuminen.

Tietoa vaurioitumisen yksittäisistä olosuhdetekijöistä löytyy kirjallisuudesta. Niiden yhteisvaikutusta on kuitenkin vähemmän tutkittu, varsinkaan kestoajan vaikutuksesta ei löydy tutkimusaineistoa.

Ikkunoiden puuosien laatu on huonontunut, koska teollisessa valmistuksessa ei raaka-ainetta valikoida ikkunoiden eri osien vaatimusten mukaisiksi. Alakarmi ja -puite ovat vaurioitumiselle alttiissa paikassa ja niihin tulisi kiinnittää enemmän huomiota. Puu pitäisi valikoida siten, että se on mahdollisimman tiheätä, vähäoksaista ja suorasyistä, mielellään sydänpuuta.

Erilaisia kosteudenmittauksia ja pinnoitekokeita tehdään sekä Suomessa että ulkomailla runsaasti. Vaihtelevassa kosteudessa olevien rakenteiden pinnan suojaus on välttämätöntä, jos rakenteelle halutaan pitkä kestoikä. Rakenteet tulee myös suunnitella siten, ettei vesi pääse syvälle puuhun eikä rakenteeseen muodostu vettä kerääviä koloja. Halkeamien kautta kosteus pääsee syvälle puuhun ja edistää pinnoitetuissa rakenteissa lahon alkamista.

## 7.1 Vaurioluokitus

Koska käsite vaurio voidaan määritellä monella eri tavalla ja on epäselvää, mitä pidetään vauriona, on katsottu aiheelliseksi laatia ehdotus vaurioluokitukseksi. Sen avulla halutaan luokitella vaurion vakavuutta sekä selvittää korjaustoimenpiteiden tarve ja ajankohtaisuus. Tarkoitus on, että melko pienelläkin kokemuksella ja lyhyen katselmuksen perusteella osattaisiin määrittää vaurio ja sen luokka. Luokituksen avulla on mahdollista



löytää eri osapuolille yhteiset käsitteet vaurioista puhuttaessa.

Rakennuksen ikä vaikuttaa vaurioiden arviointiin. Jos useita vuosia vanha rakenne on kulunut, halkeillut tai maalit ovat hilseilleet puutteellisen hoidon seurauksena, ei vauriota pidetä yhtä vakavana kuin uudessa, muutamia kuukausia vanhassa rakennuksessa. Jos uusi rakenne on vaurioitunut, sen voidaan olettaa nopeasti vaurioituvan yhä enemmän, koska vaurioitumisnopeus on ollut suuri. Jos vanhassa rakenteessa vaurioituminen on tapahtunut hitaasti, sen oletetaan muuttuneissakin olosuhteissa jatkuvan hitaasti. Tästä syystä vanhojen rakenteiden vauriot hyväksytään yleisemmin kuin vauriot uusissa rakenteissa.

Esitetyssä vaurioluokituksessa vauriot jaetaan kolmeen ryhmään vaurion laajuuden ja vakavuuden mukaan. Luokassa 1 vauriot ovat esteettisiä, luokassa 2 on muutakin vaurioitumista ja kantokyvyn alenemista selvästi havaittavissa ja luokassa 3 vaurio on niin vakava, että puuosia joudutaan uusimaan.

Tutkimuskohtien määrä on harkittava tapauskohtaisesti. Kaikki palkit on tarkastettava silmämääräisesti ja palkkien määrästä on tutkittava tarkemmin yli 30 % ja tutkiminen on tehtävä joka sivulta. Jos on syytä epäillä tiettyjä kohtia palkeissa tai rakenteissa muita vaurioituneemmiksi, valitaan myös nämä tutkimuskohdiksi.

Pientalojen alapohjien lahovaurioiden luokittelemiseksi on kaikkien kosteiden tilojen ympäristöt tutkittava ja lisäksi 3 - 4 kohtaa muualta alapohjasta. Yläpohjista, välipohjista, seinistä ja muista rakenteista vaurioita etsittäessä ja luokiteltaessa on tutkimuspisteitä oltava rakennuksen koon huomioonottaen riittävästi. Niiden on

sijaittava eri puolilla rakennusta.

Vaurioitumattoman puun tulee olla puhtaan puun tai pinnoitteen väristä. Pinnan on oltava kova ja halkeilematon. Oksien tulee olla kiinni ympäröivässä puussa ja lautojen on oltava suorina.

Sahatavaran lujuuslajitteluoppaan /91/ mukaan saa sahatavarassa halkeaman syvyys 0,8 mm:n rakotulkilla mitattaessa olla lujuusluokassa T40 t/4, T30 t/3 sekä T24 ja T18 t/2, missä t on sahatavaran paksuus. Halkeaman pituutta ei ole rajoitettu.

#### Vaurioluokka 1 , vähän vaurioituneet

Tämän luokan vaurioita ovat pelkät esteettiset vauriot eli värivauriot ja homepilkkujen muodostuminen puurakenteen pinnalle. Laho ei saa olla lainkaan ja puun on oltava pinnaltaan kovaa. Pintahalkeamia saa esiintyä, leveys korkeintaan 3 mm ja syvyys alle 30 mm 0,1 mm:n rakotulkilla mitattuna. Nämä arvot pätevät palkeille, joiden leveys on yli 140 mm. Tätä kapeammilla rakenteilla on luokituksen perusteita harkittava tapauskohtaisesti. Pinnoitettujen rakenteiden pinnoitteessa saa olla hiushalkeamia ja lieviä värinmuutoksia.

Vaurioiden vuoksi rakenteen kunnon tarkkailua täytyy tehostaa, mutta välittömiin korjaustoimenpiteisiin ei tarvitse ryhtyä.

#### Vaurioluokka 2 , selvästi vaurioituneet

Rakenteet, joiden pinta on kauttaaltaan tummunut ja pehmennyt värinmuutoksen tai runsaan homeenmuodostuksen vuoksi, kuuluvat tähän luokkaan. Lahoamista saa olla alle 10 % pinta-alasta, mutta puun on muualta oltava kovaa.



Terävällä esineellä kaavittaessa ei saa irrota kuin pintakerroksen pehmennyt puu. Terävä esine ei saa massiivisilla rakenteilla työntyä kevyesti painettaessa puun sisään 10 mm syvemmälle, eikä ohuilla yli 1/4 rakennepaksuudesta.

Halkeamien leveys saa liimapuupalkissa (vrt.luokka 1) olla 6 mm ja syvyys 70 mm 0,1 mm:n rakotulkillä mitattuna. Hirsirakenteet muodostavat tähän kohtaan poikkeuksen. Niiden halkeilua ei yleensä pidetä vauriona, vaan hirsirakenteiden ominaisuutena.

Pinnoite voi olla halkeillutta, mutta irtiliuskottumista ei saa esiintyä laajoilla alueilla, yli 20 % pinta-alasta. Värjäntymistä saa pinnassa esiintyä. Rakenteen tulee olla korjattavissa siten, että irtoava pinnoite poistetaan ja puuosia vaihtamatta pinnoitetaan uudelleen.

Luokka 2 jaetaan kahteen alaluokkaan 2A ja 2B. Luokkaan 2A kuuluvat vauriot, joilla ei ole rakenteen kantavuuden ja toimivuuden kannalta merkitystä. 2B-luokassa ovat vauriot, jotka vähentävät rakenteen kantokykyä ja kelpoisuutta.

Rakenteiden korjaamiseksi on tehtävä toimenpide-ehdotukset ja suunniteltava korjauksen aikataulu. Korjaustarve ei ole välitön, mutta korjaamattomuus saa rakenteet nopeasti kuulumaan luokkaan 3.

### Vaurioluokka 3 , vakavasti vaurioituneet

Tässä luokassa vaurioituminen on joko pitkälle edenneiden vaurioiden yhteisvaikutusta tai vakava yhden tyyppin vaurio. Vauriot ovat merkittäviä rakenteen toimivuuden ja kantokyvyn kannalta.

Kun lahovauriota on yli 10 % pinta-alasta, tai sen syvyys on yli 10 mm, vaurio kuuluu luokkaan 3. Lahottajasieni saattaa hävittää puun kokonaan tai pehmittää sen kantokyvyttömäksi. Vaurion vakavuus riippuu tällöin siitä, onko vaurioitunut rakenne osana kantavaa rakennetta. Pahoin lahonneessa puussa saattaa kovan pinnan alta löytyä täysin pehmennettyä puuta.

Halkeamien leveys on yli 6 mm tai syvyys yli puolet palkin paksuudesta. Jännityshuippujen, kuten lovien ja ripustusten kohdille syntyvät halkeamat ovat vaarallisia ja kuuluvat usein 6 mm:ä kapeampinakin tähän luokkaan. Jos palkki on pahasti vaurioitunut, on selvitettävä, voivatko viereiset palkit kantaa osan sille tulevasta kuormasta. Myös viereisten palkkien kunto tulee selvittää.

Kolmannen luokan pinnoitevauriossa pinnoite on laajoilta alueilta hilseillyt irti ja puu sen alla on lahonnut ja pehmennyt. Rakenne ei enää ole korjattavissa siten, että irtoava pinnoite poistetaan ja maalataan uudestaan, vaan puuta on uusittava. Korjaustarve on välitön, jos halutaan pitää rakenteet käyttökelpoisina.



Taulukko 7.1 ehdotus vaurioluokitukseksi

Vaurio- luokka	Vaurio- tyyppi	Määrittely	Huom!
1	halkeamat	leveys < 3mm syvyys < 30 mm	1)Pätee palkeil- le, joiden le- veys yli 140mm
	laho	ei saa esiintyä	2)0,1mm:n rako- tulkilla mi- tattuna
	home	homepilkkuja	
	pinnoite- vaurio	hiushalkeamia värinmuutoksia	TARKKAILUA TEHOSTETTAVA
2	halkeamat	leveys < 6 mm syvyys < 70 mm	1) 2)
	laho	alle 10 % pinta- alasta tummunut tai pehmennyt < 10 mm tai 1/4 rakenne- paksuudesta	rakenne on kor- jattavissa ilman puuosien vaihta- mista
	hometta	runsaasti	
	pinnoite- vaurio	halkeamia irtiliuskottumista <20 % pinta-alasta	KORJAUSTOIMEN- PITEET SUUN- NITELTAVA
3	halkeamat	leveys > 6 mm syvyys > 1/2 pal- kin paksuudesta	1) lovien ja ripus- tusten kohdalla harkinnan mukaan leveys < 6 mm
	laho	yli 10 % pinta- alasta tai täysin pehmennei- tä tai hävinneitä kohtia	rakenne ei ole korjattavissa ilman puuosien vaihtamista
	pinnoite	laajoilta aloilta irti, puu alla pehmeää tai la- honnutta	VÄLITÖN KORJAUSTARVE

## 7.2 Jatkotutkimusehdotuksia

Luokitusta tulisi testata peruskorjausten yhteydessä. Kokemusta tarvitaan korjausrakentamistoiminnan eri osapuolilta, jotta luokituksesta tulee selkeä ja yksiselitteinen. Yksiselitteisyys vaatii tarkempia ohjeita mittausajankohdasta ja -menetelmistä, sekä tarkempaa tapaa kovuuden mittaamiseksi esim. akustisin menetelmin. Ajan vaikutuksen huomioonottaminen rakenteiden vaurioita arvioitaessa tulisi myös selvittää. Kokeellisella tutkimuksella voitaisiin eri vaurioluokkien vauriot määrittelevät rajat tarkistaa ja tutkia niiden järkevyys.

Vaurioluokitusta voidaan kehittää siten, että sen rinnalle laaditaan rakenteiden vaurioalttiusluokitus. Siinä ympäristöolosuhteista, kuten kosteus- ja lämpötilanvaihtelu, auringon säteily yms. riippuen rakenteet jaetaan luokkiin sen mukaan, miten vaurioitumiselle alttiita ne ovat. Vaurioalttiusluokituksen yhteyteen voisi kehittää ohjeita tarvittavista suojaustoimenpiteistä sekä siitä, miten usein rakenteiden kunto on tarkistettava.

Tutkimustarvetta halkeilun syntymiseen vaikuttavista tekijöistä on runsaasti. Halkeamien syntymishetkeä erilaisilla kosteushistorioilla ja kosteuspitoisuuksilla tulisi selvittää. Vertailun kohteena halkeamien syntymiseen vaikuttavina tekijöinä voisivat olla eri puulajit, erilaiset kuivaukset, käyttölämpötilat ja pinnoitteet.

Ajan vaikutusta kosteusvaurioiden syntymiseen pitäisi selvittää. Muuttuvina tekijöinä ajan lisäksi tulisi tutkia erilaisia kosteuspitoisuuksia, lämpötiloja sekä hapen ja ravintoaineiden määrää puussa. Näiden yhteisvaikutus puun lahoamiseen kaipaa tutkimista.



Eri rakennusaineiden puulle aiheuttamia kontaktivaurioita pitäisi tutkia. Kontakteihin liittyvät kriittiset kosteuserot, materiaaliominaisuudet ja ajan vaikutus tulisi selvittää. Kuvan 4.3 kaltaisia eri materiaalien kosteuskäyttäytymistä kuvaavia käyriä tulisi laatia lisää.

Jatkuvaa puun- ja ilmankosteuden mittausta tulisi tehdä toimivassa rakennuksessa. Huomiota tulisi kiinnittää erityisesti kriittisimpiin paikkoihin, kuten ylimpiin kohtiin, ilmanvaihtoventtiilien ympäristöihin ja ovien yläpuolisiin rakenteisiin.

Liitteessä 1 esitettyjen kosteuspitoisuuksien ja lämpötilojen tarkistus vastaamaan Suomen oloja on mahdollinen jatkotutkimusaihe.

## 8 YHTEENVETO

Merkittävimmit tekijät puun rakenteessa vaurioitumisen kannalta ovat sen anisotrooppisuus ja hygroskooppisuus. Eri suuntien kosteusmuodonmuutokset ovat eri suuruisia, minkä vuoksi puuhun syntyy sisäisiä jännityksiä. Sisäiset jännitykset pyrkivät laukeamaan puun kuivuessa, mikä johtaa kieroutumiseen, vääntymiseen sekä halkeiluun.

Puuhun kasvuvaiheessa tulevia vikoja ovat haavat, oksat ja reaktiopuun muodostuminen. Haavoissa saattavat bakteerit ja sienet aiheuttaa vaurioita. Oksien vetolujuutta alentava vaikutus voi olla jopa 85 %. Reaktiopuun käyttöä haittaa sen suuri syynsuuntainen kutistuminen, lylyllä 6 - 7 % ja vetopuulla noin 1 %.

Vakavimmat vauriotyypit ovat halkeilu, lahovauriot sekä home- ja sinistymäauriot. Yleisin vaurio puurakenteissa ovat halkeamat. Suurin osa halkeiluvaurioista johtuu puun kosteuspitoisuuden nopeasta alenemisestä. Lahovaurioiden syynä ovat yleensä rakennevirheet tai korjaus- ja huoltotoimenpiteiden laiminlyönti. Lahottajasienet alentavat puun lujuutta käyttämällä ravinnokseen puun perusaineita, selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä. Home- ja sinistäjä sienet elävät puun soluonteloiden ravintoaineilla, eivätkä vaikuta puun lujuuteen. Sinistäjä sienet tulevat helpommin männyn pintapuuhun kuin kuuseen.

Lahonarimpia suomalaisista puulajeista ovat lehtipuut ja mänty pintapuuosaltaan. Männyn on todettu olevan aina kuusta kosteampaa, jos säilytysolosuhteet ja pintakäsittely ovat samat. Lahottaja- ja sinistäjä sienien rihmastojen kasvu alkaa puun kosteuden ollessa noin 20 % ja lämpötilan  $+ 0 - 5^{\circ}\text{C}$ . Ne kasvavat parhaiten  $+ 25 - 30^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa ja puun kosteuden ollessa 35 - 50 %.



Puun pinta kuluu auringonvalon, tuulen, sateen ja saasteiden vuoksi lehtipuilla 2 - 5 mm sadassa vuodessa ja havupuiden kevätpuussa 5 - 10 mm.

Puurakenteiden vauriotutkimuksissa on havaittu runkorakenteiden lahoamista, joka johtuu puutteellisen höyrynsulun läpi tunkeutuneesta kosteudesta. Kosteus kerääntyy rakenteisiin aiheuttaen puun lahoamis- ja homehtumisvaaran sekä huonontaan eristeiden lämmöneristyskykyä. Puutteellinen rakenteen tuuletus aiheuttaa ongelmia, koska rakenteeseen kerääntyvä vesi ei poistu kuivumiskauden aikana.

Pinnoitteilla pyritään estämään sekä kosteuden pääsy puuhun että pinnan kosteusmuodonmuutokset. Niillä myös vaikeutetaan sienien kasvua puussa. Mitä tiiviimmän kalvon pinnoite muodostaa puun pinnalle, sitä vaikeampaa on myös puuhun päässeen kosteuden haihtuminen. Koska puu imee pituussuunnassa jopa 8 kertaa enemmän kosteutta kuin syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, on myös ikkunoiden karmi- ja puitepuiden päiden suojaaminen selvästi vaurioitumista vähentävä tekijä.

Kontaktivaurioita aiheutuu sekä muiden rakennusaineiden kuljettaessa vettä puun pinnalle että niiden estäessä puun kuivumisen. Eri materiaalien ollessa kosketuksissa imee pienihuokoisempi vettä itseensä viereisen materiaalin isommista huokosista.

# KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Kanko, T. Mittaustietoa julkisivujen säärasituksista. Ruutu 14/1987.
- /2/ Kangas, J. Liimapuun liitosvaurioista. RIL K48-1985 Esitelmä kurssilla "Puurakenteiden liitokset".
- /3/ Tiirikainen, J. Pientalojen puurakenteiset tasakattot - rakenteiden lahovauriot ja vaurioiden syntyyn vaikuttavat tekijät. Lisensiaattityö, TKK Arkkitehtiosasto, Espoo 1987.
- /4/ Bergman, J. , Viljanen, M. Ohutlevykatteisen yläpohjan lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen. TKK, Rakennetekniikan laitos, Talonrakennustekniikan laboratorio, Espoo 1986.
- /5/ Pöljö, T. Puuikkunan kestävyysvaikutuksista. Paperi ja Puu , Numero 12 , Vol 60 , 1978-12-29.
- /6/ Vanhatalo, L. Maalikalvon ominaisuuksien vaikutus kosteuden läpäisevyyteen puualustalla. Diplomityö, LTKK, Kemiantekniikan laitos , 1985.
- /7/ Paajanen, L. , Mansikkamäki, P. Pohja- ja pintakäsittelyjen vaikutus puun säänkestävyyteen. VTT-tutkimuksia 174 , 1983.
- /8/ Loon, J. von The Interaction between Paint and Substrate. Journal of Oil Colour Chem. Assoc. , 49(1966) 10.
- /9/ Browne, F. L. Swelling of Springwood and Summerwood in Softwood. Forest Products Journal , 7(11) 1957.



- /10/ Kleive, K. , Lund, T. J. ym. Wood Surface Degradation and Consequences for the Durability of Coating Systems. FATIPEC XVI , Liege , Belgia.
- /11/ Hulden, M. , Rosenqvist, L. Ikkunarakenteet hajoavat - maalissako vika ? Rakennustaito 19/1983.
- /12/ Sell, J. Untersuchungen Zur Optimierung des Oberflächenschutzes von Holzbauteilen. Holz als Roh- und Werkstoff , 40 (6) 1982.
- /13/ Viitanen, H. , Mansikkamäki, P. Puisten julkisivujen kunto ja kestoikä. VTT-tiedotteita 214, Espoo 1983.
- /14/ Kärkkäinen, M. Puu - sen rakenne ja ominaisuudet. Helsinki 1977.
- /15/ Kaila, P. , Vihavainen, T. ym. Rakennuskonservointi - museokohteena säilytettävien rakennusten korjausopas. Suomen Museoliiton julkaisuja 27. Helsinki 1979.
- /16/ Vihavainen, T. Puun säänkestävyys. Rakennustekniikka 6 / 1982.
- /17/ Browne, F. L. Wood siding left to weather naturally. So. Lbrm 201(2513), 1960.
- /18/ Haygreen, J.G., Bowyer, J.L. Forest products and wood science. Iowa 1982.
- /19/ Sell, J. , Feist, W. C. Role of Density in the Erosion of Wood during Weathering. Forest Products Journal, Vol 36 ,No 3.

- /20/ Sell, J. , Leukens, U. Weathering Phenomena of Unprotected Wood Species. Holz als Roh- und Werkstoff, (29) 1971, heft 1.
- /21/ Feist, W. C. , Mraz, E. A. Comparison of Outdoor and Accelerated Weathering of Unprotected Softwoods. Forest Products Journal, Vol 28 , No 3. 1978.
- /22/ Stenbäck, A. Laho- ja sinistymävauriot. Esitelmä kurssilla INSKO 43 - 70 , "Puurakenteiden lahonsuojausmenetelmät, mahdollisuudet". Helsinki 1970.
- /23/ Vihavainen, T. Puun tuhoutuminen. Eri puulajien kyllästettävyyys ja painekyllästetyn puun laadunvalvonta. Esitelmä kurssilla INSKO 43 - 70 , "Puurakenteiden lahonsuojausmenetelmät, mahdollisuudet". Helsinki 1970.
- /24/ Viitanen, H. Vuosina 1978 - 84 tutkitut lahovaurionäytteet. VTT-tiedotteita 593 , Espoo 1986.
- /25/ Axen, B., Hyppel, A. ym. Mögel i bjälklag - undersökningsrutiner och skadefall. Byggforskningsrådet. Tukholma 1980.
- /26/ Saarelainen, U Puurakenteet 1, Puu materiaalina. Rakentajain kustannus OY, Helsinki 1981.
- /27/ Darrell , Nicholas Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments , Vol 1, Degradation and Protection of Wood. Syracuse, N.Y. 1973.



- /28/ Vihavainen, T. Puurakenteiden lahontorjunta. Helsinki 1978.
- /29/ Kollman, F. F. P. , Wilfred, A , Cote, Jr. Principles of Wood Science and Technology I , Solid Wood. Heidelberg 1968.
- /30/ Mitä maalia mihinkin ?, Tikkurila OY, Vantaa 1984.
- /31/ Vihavainen, T. Puu maalauslustana. Ruutu 4/1982.
- /32/ Richardson, B. A. Wood preservation. Lancaster, England 1978.
- /33/ Kolli, E. , Nurmi, S. Liimapuupalkkien rekla-  
maatioita aiheuttavia tekijöitä ja syitä sekä nii-  
den ennalta ehkäisy. Esitelmä Liimapuuyhdistyksen  
seminaarissa 1.10.1986.
- /34/ Saur, I. , Seehann, G , Liese, W. Studies of the  
Blueing of Spruce Wood from Immission-damaged  
Stands. Holz als Roh- und Werkstoff , 44(1986).
- /35/ Panshin, A. J. , de Zeeuw, C. Textbook of Wood  
Technology. Structure, Identification, Properties,  
and Uses of the Commercial Woods of United States  
and Canada. USA 1980.
- /36/ Jensen, W. Puukemia. Suomen Paperi-insinöörien  
Yhdistyksen oppi- ja käsikirja I. Turku 1977.
- /37/ Zimmermann, M. H. Xylem Structure and the Ascent  
of Sap. Heidelberg 1983.
- /38/ Stamm, A. J. Wood and Cellulose Science. New  
York 1964.

- /39/ Henningson, B. , Jermer, J. Undersökningar av korrosion på metallföremål i kontakt med impregnerat virke utomhus. Svenska Träskyddsinstitutet , Meddelanden Nr 144, 1982.
- /40/ Puurakenteiden suunnitteluohjeet, RIL 120 - 1983 , Suomen Rakennusinsinöörien Liitto , SFS 4188.
- /42/ Bodig, J. , Jayne, A. B. Mechanics of Wood and Wood Composites. New York 1982.
- /43/ Siau, J. F. Transport Processes in Wood. Berlin 1984.
- /44/ Siimes, F. E., Liiri, O. Puun lujuustutkimuksia I. Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos, Tiedotus 103, Helsinki 1952.
- /45/ Mika Leivon haastattelu 7.1. 1987.
- /46/ Desch, H. E. Timber - Its Structure and Properties. London 1973.
- /47/ Samuelsson, I. Mögel i hus - orsaker och åtgärder. Statens provningsanstalt, Teknisk rapport 1985:16.
- /48/ Nevander, L.E. , Elmersson, B. Fukthandbok - teori, dimensionering, konstruktion. Tukholma 1981.
- /49/ Nurmi, A. Katsaus kuusen kyllästykseen. Seminaariesitelmä VTT:n Puulaboratorion Kuusiseminaarissa 12.5.1987.
- /50/ Tuovinen, U. Puun kemiallisen suojauksen tavat. Esitelmä kurssilla INSKO 43 - 70 "Puurakenteiden lahonsuojaus - menetelmät , mahdollisuudet". Helsinki 1970.



- /51/ Uimahallitoimikunta II:n mietintö. Komiteanmietintö 1985:5 , Helsinki 1985.
- /52/ Pöljö, T. Puisten ikkunoiden ja ulko-ovien säänkeston parantaminen. Rakennuspuusepänteollisuus RY , 1978.
- /53/ Ahokas, R. Rakenteellinen lahontorjunta ja kyllästämismenetelmät. Licensiaattiseminaari TKK, R-osasto, 1983.
- /54/ Kanko, T. Kuusen käyttö puujulkisivuissa ja ikkunoissa. Seminaariesitelmä VTT:n Puulaboratorion Kuusiseminaarissa 12.5.1987.
- /55/ Jensen, B. von Experience with Double-vacuum Impregnation in Denmark. Holz als Roh- und Werkstoff , 33(1975) 2.
- /56/ Lauhava, J. Kokemuksia kuusen käytöstä rak.puuteollisuudessa. Esitelmä VTT:n Puulaboratorion Kuusiseminaarissa 12.5.1987.
- /57/ Skaar, C. Water in Wood. New York 1972.
- /58/ Kubler, H., Liang, L., Chang, L.S. Thermal expansion of moist wood. Wood and Fiber 5(3) 1973.
- /59/ Wright, K. Männyn ja kuusen murtumissitkeyden määrittäminen CT-koekappaleilla. VTT - tutkimuksia 378 , Espoo 1986.
- /60/ Kanko, T. Kosteusvaihteluiden vaikutus puurakenteiden käyttöikään. Licensiaattiseminaari TKK Rakennusinsinööriosasto , 1983.
- /61/ Kangas, J. Puurakenteet 3 , Liitokset . Rakentajain Kustannus OY , Helsinki 1982.

- /62/ Pohjola, A. Hirsirakenteiden sadetiiviys. Erikoistyö, TKK Rakennusinsinööriosasto, 1986.
- /63/ Lattiasienivauriot. RT-kortti RT 08 - 10132, Rakennustietosäätiö, Helsinki 1981.
- /64/ Niskala, E. Kuntoarviointi korjausrakentamistoimenpiteiden määritysten perustana. Esitelmä VTT:n Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkimusosaston korjausrakentamisen tutkimuspäivillä Espoossa 25.11.1986.
- /65/ Lankinen, A. Puun kosteuden määrittäminen vastusmittausmenetelmällä. Diplomityö, LTKK Koneenrakennuksen laitos 1984.
- /66/ Henningson, B. Olika träskyddsmedels effekt mot mögel- och blånadssvampar på inbyggt virke. Svenska Träskyddsinstitutet, Meddelanden Nr 147, 1984.
- /67/ Meierhofer, U. Investigations for Optimizing the Surface Treatment of Timber Construction Elements, Part 2 : Weathering Tests on Glulam Segments. Holz als Roh- und Werkstoff 41(1983) 197 - 202.
- /68/ Meierhofer, U.A. Behavior of weather exposed glue-laminated wood impregnated with waterborne and oil preservatives. Holz als Roh- und Werkstoff 44(1986) 173 - 177.
- /69/ Miller, E.R., Boxall, J. The effectiveness of end-grain sealers on improving paint performance in softwood joinery, L-joint results after 4 years natural weathering. Holz als Roh- und Werkstoff 45(1987) 69 - 74.



- /70/ Dinwoodie J.M. Timber - its nature and behaviour, New York 1981.
- /71/ Selbo, M.L. Long Term Effect of Preservatives On Gluelines in Laminated Beams. Forest Products Journal , Vol. 17 No. 5 , 1967.
- /72/ Karlsruhen yliopiston tutkimus Byring Chemicals KY:lle , "Halkeilun muodostuminen liimapuupalkeissa kuivumisen tai kosteuden lisääntymistä seuranneen kuivumisen johdosta", suomennos 1978.
- /73/ Mahlberg, R. Puuosien päätysulkeminen. Esitelmä VTT:n Puulaboratorion Kuusiseminaarissa 12.5.1987.
- /74/ Tulla, K. Puurunkoisten omakotitalojen alussoiron kosteuspitoisuus . VTT - tiedotteita 286, Espoo 1984.
- /75/ Kanko, T. Hengittävä ulkovaippa , Tuulensulkulevyjen vertailu VTT:n koetalossa. Loppuraportti 10.6.1986. (julkaisematon)
- /76/ Leivo, M. Kuormitusajan ja käyttöolojen vaikutukset naulalevyrakenteen taipumaan. VTT - tutkimuksia 457 , Espoo 1986.
- /77/ Feldborg, T., Johansen, M. Wood Trussed Rafter Design. Danish Building Research Institute , Horsholm 1981.
- /78/ Ikkunoiden lahovauriotutkimus, kenttäkartoitus. VTT - Puutavaralaboratorio , Tutkimusselostus, julkaisematon, 1977.

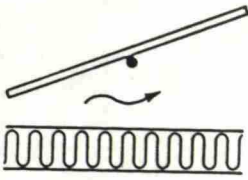
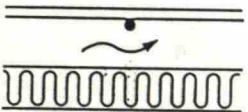
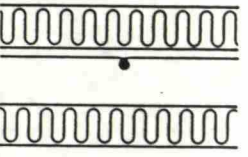
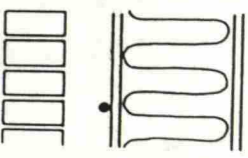
- /79/ Sell, J., Kuhne, H. Schäden bei Holzfenstern durch Verarbeitungsfeuchtigkeit und Vermorschung. Holz in Handwerk 12/1972.
- /80/ Tack, C.H. Window Joinery in Service. Building 5/1986 , 135 - 136.
- /81/ Möhler, K., Steck G. Rissbildung in Brettschichtträgern durch Trocknung oder durch Trocknung nach vorheriger Feuchtigkeitszunahme. Untersuchungen, durchgeführt im Auftrage der EGH in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. 1977.
- /82/ Tapio Jauhiais haastattelut 17.6.1987 ja 26.6.1987, Espoo.
- /83/ Kaila, P. Raportti Revonlahden kirkon tarkastuksesta 14.2.1985, Helsinki.
- /84/ Jorma Kankaan haastattelu, VTT 15.12.86, Espoossa.
- /85/ Billgren, G., Grönlund, A. Träfönsters beständighet, Rapport R12;1977. Byggforskningen.
- /86/ Billgren, G. Träfönsters beständighet, Del 2: Fönstes utformade enligt aktuell SIS-standard . Rapport R44;1978. Byggforskningen.
- /87/ Andersson, K.A., Burström, P.G. Fogar i träfönster. Förstudie , Rapport R141;1983. Byggforskningsrådet.
- /88/ Hietanen, K. Kemin uimahallin kattovaurio, Esitelmä Liimapuuyhdistyksen seminaarissa 1.10.1986.



- /89/ Bazant, Z.P. Constitutive Equation of Wood at Variable Humidity and Temperature, Wood Science and Technology 1985:19.
- /90/ Stamm, A.J. Passage of liquids, vapors and dissolved materials through softwoods. United States Department of Agriculture. Washington D.C. Technical bulletin no. 929(1946)
- /91/ Lipitsäinen R. Sahatavaran lujuuslajitteluopas, Sahatavaran lujuuslajitteluyhdistys r.y., Espoo 1982.

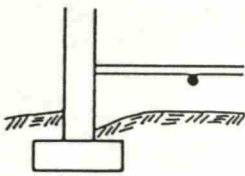
YHTEENVETO OLETETTAVISTA KOSTEUSPITOISUUKSISTA  
JA LÄMPÖTILOISTA ERI RAKENNUSOSISSA /47/

Alla olevassa taulukossa on esitetty lyhyesti, minkälaisia kosteuspitoisuuksia voidaan olettaa esiintyvän normaalisti toteutetuissa rakenteissa. Taulukkoon on otettu mukaan vain tavallisimmat puuta sisältävät rakenteet.

Rakenne	Oletettu ilman suhteellinen kosteus (%RH)	Puun kosteuspitoisuus (%)	lämpötila
<b>Tuuletettu katto</b> 	talvi 85 - 95 kesä 40 - 70	20 - 26 9 - 14	$<5^{\circ}\text{C}$ $>15^{\circ}\text{C}$
<b>Tasakatto</b> 	talvi 85 - 95 kesä 40 - 70	20 - 26 9 - 14	$<5^{\circ}\text{C}$ $>15^{\circ}\text{C}$
<b>Lisäeristetty tasakatto</b> 	talvi 50 - 70 kesä 50 - 70	11 - 14 10 - 14	$0 - 10^{\circ}\text{C}$ $15 - 20^{\circ}\text{C}$
<b>Tiiliverhoiltu ulkoseinä</b> 	talvi 85 - 95 kesä 40 - 95	20 - 26 9 - 28	$<5^{\circ}\text{C}$ $>15^{\circ}\text{C}$
(korkeat arvot vastaavat kosteata tiiltä)			

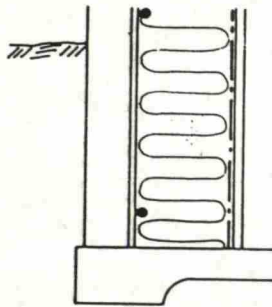


# **Ryömintätila**



talvi	70 - 85	15 - 20	<5°C
kesä	80 - 95	18 - 26	>10°C

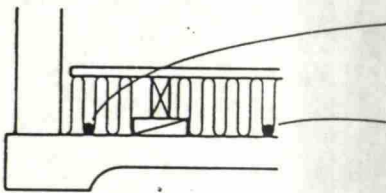
# **Kellarinseinä, jossa tiivis sisäpinta**



talvi	85 - 95	20 - 26	<5°C
kesä	40 - 70	18 - 26	>15°C

talvi	40 - 70	9 - 14	noin 10°C
kesä	70 - 95	14 - 26	10 - 15°C

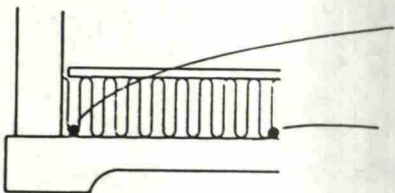
# **Ylösnostettu lattia**



talvi	70 - 95	14 - 26	5 - 10°C
kesä	70 - 95	14 - 26	noin 15°C

talvi	70 - 85	14 - 20	noin 15°C
kesä	70 - 85	14 - 20	15 - 18°C

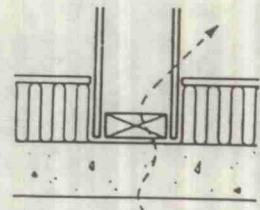
# **Uiva lattia**



talvi	80 - 95	18 - 26	5 - 10°C
kesä	80 - 95	18 - 26	noin 15°C

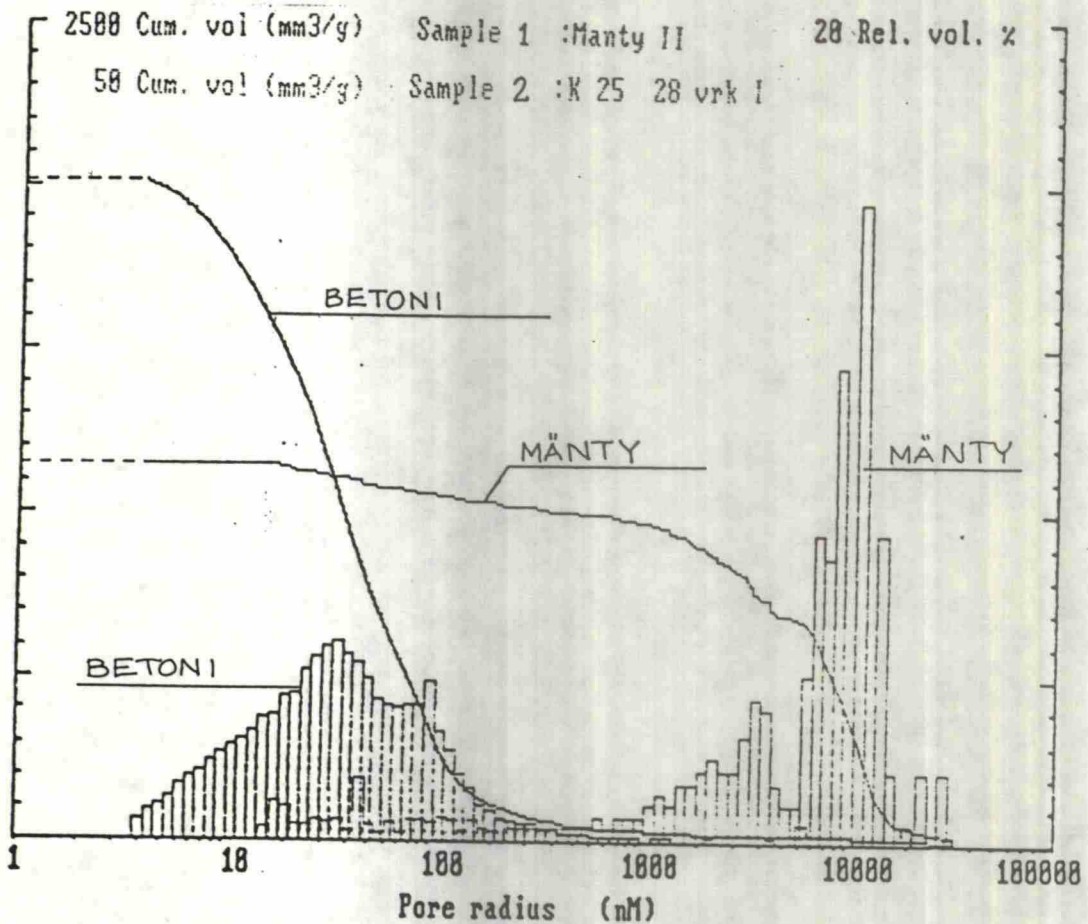
talvi	80 - 85	18 - 26	noin 15°C
kesä	80 - 85	18 - 26	15 - 18°C

Huom! Väliseinissä, jotka ovat suoraan betonilaatan päällä ilman alapuolista eristettä, ovat arvot yleensä alhaisempia kuin yllä annetut. Syy on diffuusio eristeen ja seinän kautta.



## HUOKOSKOKOJAKAUMAT MÄNNYLLE JA BETONILLE

Nämä huokoskokojakaumat on määritetty Teknillisen Korkeakoulun Betonitekniikan laboratorion elohopeaporosimetrillä. Männyn pienimmät huokokset ovat noin 10 nm säteeltään, eniten huokosia osuu alueelle 6 - 11  $\mu\text{m}$ . Tulokset ovat hyvin yhdenpitävät sivun 32 lähdeteoksesta /90/ otettujen arvojen kanssa. Vertailukohteena esitetty betonin huokoskokojakauma.





TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
RAKENNE- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN  
LAITOSTEN KIRJASTO